Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014

Austrian Panel on Climate Change (APCC)

Austrian Assessment Report 2014 (AAR14)

















Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften

Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014
Austrian Assessment Report 2014 (AAR14)

HerausgeberInnen
Helga Kromp-Kolb
Nebojsa Nakicenovic
Karl Steininger
Andreas Gobiet
Herbert Formayer
Angela Köppl
Franz Prettenthaler
Johann Stötter
Jürgen Schneider

Diese Publikation wurde einem anonymen, internationalen Peer-Review-Verfahren unterzogen.

Dieser Sachstandsbericht entstand im Zuge des Projektes „Austrian Panel on Climate Change Assessment Report", das aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen des Programms „Austrian Climate Research Program" durchgeführt wurde.

Veröffentlicht mit Unterstützung des Austrian Science Fund (FWF): PUB 221-V21



Wien, September 2014

ISBN 978-3-7001-7699-2

Titelseitengestaltung
Anka James, auf Basis von Sabine Tschürtz in Munoz and Steininger, 2010.

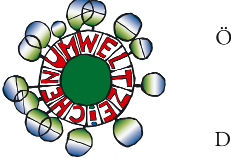
Übersetzung der Zusammenfassung für Entscheidungstragende ins Englische
Bano Mehdi

Zitierweise des Gesamtbandes
APCC (2014): *Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14)*. Austrian Panel on Climate Change (APCC), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich, 1096 Seiten. ISBN 978-3-7001-7699-2

Die Zitierweise für einzelne Kapitel findet sich im Anhang 3.

In der vorliegenden Publikation sind die *Zusammenfassung für Entscheidungstragende* in deutscher und englischer Sprache, die *Synthese* in deutscher Sprache und der Volltext enthalten. Die *Zusammenfassung für Entscheidungstragende* und die *Synthese* sind gemeinsam auch als Broschüren jeweils in deutscher und englischer Sprache erhältlich, die *Zusammenfassung für Entscheidungstragende* auch allein.

Alle Teile dieses Berichts sind im Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften publiziert und sowohl im Buchhandel als auch unter www.apcc.ac.at erhältlich.



Österreichische Akademie der Wissenschaften, Wien
http://verlag.oeaw.ac.at
http://hw.oeaw.ac.at/7699-2

Druck: Wograndl Druck GmbH, 7210 Mattersburg

Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014
Austrian Panel on Climate Change (APCC)
Austrian Assessment Report 2014 (AAR14)

Projektleiter / Project Leader
Nebojsa Nakicenovic

Organisationskomitee / Organizing Committee
Helga Kromp-Kolb, Nebojsa Nakicenovic, Karl Steininger

Projektmanagement / Project Management
Laura Morawetz

Co-Chairs
Band 1: Andreas Gobiet, Helga Kromp-Kolb
Band 2: Herbert Formayer, Franz Prettenthaler, Johann Stötter
Band 3: Angela Köppl, Nebojsa Nakicenovic, Jürgen Schneider, Karl Steininger

Koordinierende LeitautorInnen / Coordinating Lead Authors
Bodo Ahrens, Ingeborg Auer, Andreas Baumgarten, Birgit Bednar-Friedl, Josef Eitzinger, Ulrich Foelsche, Herbert Formayer, Clemens Geitner, Thomas Glade, Andreas Gobiet, Georg Grabherr, Reinhard Haas, Helmut Haberl, Leopold Haimberger, Regina Hitzenberger, Martin König, Manfred Lexer, Wolfgang Loibl, Romain Molitor, Hanns Moshammer, Hans-Peter Nachtnebel, Franz Prettenthaler, Wolfgang Rabitsch, Klaus Radunsky, Hans Schnitzer, Wolfgang Schöner, Niels Schulz, Petra Seibert, Sigrid Stagl, Robert Steiger, Johann Stötter, Wolfgang Streicher, Wilfried Winiwarter

Review EditorInnen / Review Editors
Brigitte Bach, Sabine Fuss, Dieter Gerten, Martin Gerzabek, Peter Houben, Carsten Loose, Hermann Lotze-Campen, Fred Luks, Wolfgang Mattes, Sabine McCallum, Urs Neu, Andrea Prutsch, Mathias Rotach

Wissenschaftlicher Beirat / Scientific Advisory Board
Jill Jäger, Daniela Jacob, Dirk Messner

Qualitätssicherung / Review Process
Mathis Rogner, Keywan Riahi

Sekretariat / Secretariat
Benedikt Becsi, Simon De Stercke, Olivia Koland, Heidrun Leitner, Julian Matzenberger, Bano Mehdi, Pat Wagner, Brigitte Wolkinger

Finales Lektorat / Copy Editing
Thomas Reithmayer, Matthias Litschauer

Layout und Formatierung / Layout and Formatting
Valerie Braun, Kati Heinrich, Tobias Töpfer

Beteiligte Institutionen

Die folgenden Institutionen ermöglichten MitarbeiterInnen dankenswerterweise die Mitwirkung an der Erstellung des AAR14 und haben dadurch wesentlich zum Sachstandsbericht beigetragen:

- Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit (AGES)
- Alpen-Adria Universität Klagenfurt - Wien - Graz
- alpS GmbH
- Amt der Tiroler Landesregierung
- ARGE Erneuerbare Energie Dachverband Gleisdorf
- Austrian Institute for Technology (AIT)
- BIOENERGY2020+ GmbH
- Bundesamt für Wasserwirtschaft (BAW)
- Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW)
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW), Abteilung VII/3 – Wasserhaushalt
- Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT), Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
- Climate Change Centre Austria (CCCA)
- Climate Policy Initiative, Venice Office
- Donau-Universität Krems
- Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH
- Institut für Entwicklungspolitik (DIE)
- International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)
- J.W.v. Goethe Universität Frankfurt am Main
- Joanneum Research Forschungsgesellschaft mbH
- komobile w7 GmbH
- Konrad-Lorenz-Institut für Vergleichende Verhaltensforschung
- Lehr- und Forschungszentrum Raumberg-Gumpenstein
- Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V (ATB)
- Management Center Innsbruck (MCI)
- Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M)
- Medizinische Universität Wien
- Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change
- MODUL University Vienna
- Naturschutzbund Steiermark
- Niederösterreichische Landesregierung
- Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung (WIFO)
- Österreichische Akademie der Wissenschaften (ÖAW)
- Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)
- Schweizer Akademie der Naturwissenschaften
- Statistik Austria
- Sustainable Europe Research Institute (SERI)
- Technische Universität Graz (TU Graz)
- Technische Universität Wien (TU Wien)
- Tierärztliche Hochschule Hannover
- Umweltbundesamt Wien
- Universität Bayreuth
- Universität für Bodenkultur (BOKU)
- Universität Graz (Uni Graz)
- Universität Innsbruck
- Universität Salzburg (Uni Salzburg)
- Universität Wien (Uni Wien)
- Universität Leiden
- Wirtschaftsuniversität Wien (WU Wien)
- Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU)
- Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG)

Inhaltsverzeichnis

Zum Geleit



Bei meiner Angelobung zum Bundespräsidenten nach meiner Wiederwahl im Jahre 2010 habe ich auf die Gefahren des Klimawandels hingewiesen, und auch auf die Verantwortung Österreichs, zur Lösung dieses großen Problems beizutragen.

In einer 3-jährigen gemeinsamen, unentgeltlichen Anstrengung haben nun über 200 Wissenschafterinnen und Wissenschafter in Österreich ihr Wissen zusammengetragen, über Disziplinengrenzen hinweg auf einander abgestimmt, und gemeinsam Schlüsse gezogen, um der Öffentlichkeit und den Entscheidungsträgern ein möglichst umfassendes und wissenschaftlich abgesichertes Bild des Klimawandels in Österreich zu zeichnen.

Komplementär zum fünfen globalen Bericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), liegt nun vom Austrian Panel of Climate Change (APCC) der Austrian Assessment Report (AAR14) vor. Er fasst zusammen, was über Klimawandel in Österreich erforscht wurde, welche Auswirkungen er hat und in weiterer Folge noch haben kann. Er zeigt Anpassungs- und Minderungsmaßnahmen auf und kommt zu dem Schluss, dass Österreich seiner Verantwortung bisher nicht in ausreichendem Maße nachgekommen ist. Er legt aber auch dar, dass es viele Handlungsoptionen gibt, die – unabhängig vom Klimawandel – Vorteile mit sich bringen würden.

Die Wissenschaft hat in eindrucksvoller Weise gezeigt, wie ernst sie den Klimawandel nimmt. Es ist zu hoffen, dass ihr Werk vermehrte politische Anstrengungen für den Klimaschutz in Österreich auslöst, und die Zivilgesellschaft / Öffentlichkeit in ihrem (wachsenden) Engagement für eine lebenswerte Zukunft gestärkt wird.

Vorbemerkungen zum Sachstandsbericht: Entstehung und Grundsätze

Vorbemerkungen zum Sachstandsbericht Klimawandel: Entstehung und Grundsätze

Warum ein Sachstandsbericht Klimawandel für Österreich?

Der Klimawandel ist eine der größten Herausforderungen für die Menschheit in diesem Jahrhundert. Das „Intergovernmental Panel on Climate Change“ (IPCC) bestätigt in seinem 2013/2014 publizierten fünften Sachstandsbericht („Fifth Assessment Report, AR5“) nochmals, was aus der Fachliteratur schon seit Jahrzehnten bekannt ist: Der Klimawandel findet statt und wird hauptsächlich durch menschliche Aktivitäten verursacht. Die mittlere globale Temperatur ist seit 1880 um fast ein Grad Celsius angestiegen. Des weiteren schlussfolgert das IPCC, dass zukünftig unverminderte Emissionen einen Temperaturanstieg um drei bis fünf Grad Celsius bis zum Ende des Jahrhunderts verursachen würden. Das IPCC Szenario mit dem höchsten Emissionsminderungsziel ist auf einen globalen Temperaturanstieg von zwei Grad Celsius bis Ende des Jahrhunderts ausgelegt – dies würde für Österreich einen Temperaturanstieg von rund vier Grad Celsius bedeuten; der bisherige mittlere Temperaturanstieg in Österreich ist ebenso bereits ungefähr zweimal so hoch wie der des globalen Durchschnitts. Die mit diesem globalen Szenario verknüpfte zukünftige Entwicklung würde bereits einen gefährlichen Klimawandel auslösen; die Emissionspfade mit höheren Emissionen können katastrophale Folgen nach sich ziehen.

Obwohl die Wissenschaft seit vielen Jahren auf den ständig fortschreitenden Klimawandel und seine Auswirkungen hinweist und trotz darauf basierender internationaler und nationaler Absichterklärungen den Klimawandel einzudämmen, nehmen die Treibhausgasemissionen weltweit weiterhin zu. Auch in Österreich zählen Klimawandelanpassung und Klimaschutz nicht zu den obersten Prioritäten der Politik. In manchen Diskussionen entsteht sogar der Eindruck, dieses Problem hätte mit Österreich wenig zu tun.

Angesichts des Ausmaßes der möglichen negativen Auswirkungen des Klimawandels und der Notwendigkeit sofort zu handeln, um den Klimawandel zu bremsen und das Klima zu stabilisieren, entstand die Idee, ähnlich den auf globaler Ebene erstellten IPCC Sachstandsberichten eine nationale Beurteilung für Österreich durchzuführen, einen Austrian Assessment Report 2014 (AAR14). Das nun vorliegende Buch ist das Ergebnis dieser Bemühungen. Es stellt einen IPCC-ähnlichen Bericht für Österreich dar, der bestehendes Wissen zum Klimawandel in Österreich, seine Auswirkungen, sowie die Erfordernisse und Möglichkeiten der Minderung und Anpassung in drei Bänden zusammenfasst, um einen ersten, umfassenden und konsolidierten Überblick über den Stand des Wissens zum Klimawandel in Österreich zu geben.

Statt eine kleine Gruppe von AutorInnen mit dieser Aufgabe zu betrauen, wurden alle zum Thema Klimawandel in Österreich Forschenden zur Mitwirkung eingeladen; die Bereitschaft war sehr groß. Letztendlich haben rund 240 WissenschaftlerInnen von rund 50 Forschungseinrichtungen den Sachstandsbericht Klimawandel (AAR14) gemeinsam erstellt. Es konnte solcherart ein wesentlich vollständigeres, disziplinenübergreifendes Bild gezeichnet werden, als dies einer kleine(ere)n Gruppe möglich gewesen wäre. Durch Zusammenführen von mit verschiedenen Ansätzen und Methoden erarbeiteten Erkenntnissen werden darüber hinaus die Ergebnisse robuster, bzw. werden weniger robuste als solche erkannt und der nach wie vor bestehende Forschungsbedarf tritt klarer zum Vorschein. Der Bericht stellt daher Entscheidungsgrundlagen für Entscheidungstragende auf unterschiedlichen Ebenen und in verschiedenen Sektoren bereit, deren Verlässlichkeit von den Forschenden gemeinsam abgeschätzt und transparent gemacht wurde (siehe dazu im Detail im Abschnitt „Umgang mit Unsicherheiten“ im Folgenden).

Die gemeinsame Anstrengung setzt auch ein deutliches und sichtbares Lebenszeichen der rasch wachsenden österreichischen „Klimaforschungscommunity“, die durch die gemeinsame Arbeit an diesem Bericht zusätzlich zusammengewachsen ist und von bisher nicht gekannten Synergien profitieren konnte.

Aufbau und Grundsätze des AAR14 im Vergleich zum IPCC AR5

Es war von Anbeginn vorgesehen, Erstellungsprozess und Struktur des Austrian Assessment Reports 2014 (AAR14) nach dem Muster des IPCC auszurichten, da sich zum einen das auf internationaler Ebene über die Jahre entwickelte Verfahren bewährt hat, und zum anderen seit dem vorletzten IPCC Sachstandsbericht (AR4) zudem weitere wesentliche Verbesserungen hinsichtlich Transparenz und Qualitätssicherung eingeführt wurden. Dennoch gibt es einige Abweichungen.

Ähnlich den IPCC-Sachstandsberichten liegt dem AAR14 das Prinzip zugrunde, entscheidungsrelevant zu sein, aber keinen empfehlenden Charakter zu haben. Dieses Prinzip kommt vor allem im 3. Band zum Tragen. Der Bericht enthält daher somit auch zahlreiche Vorschläge, welche Maßnahmen möglich oder notwendig wären, wenn bestimmte Ergebnisse oder Ziele erreicht werden sollen. Um Handeln auch im Sinne des Vorsorgeprinzips zu ermöglichen (welches das Auftreten irreparabler Schäden, etwa an der Gesundheit oder an Ökosystemen, durch geeignete Maßnahmen von vornherein auszuschließen sucht), wird getrachtet, die volle Bandbreite („best case" bis „worst case") möglicher Auswirkungen des Klimawandels darzustellen. Da der „best case" sehr häufig lediglich im Fortbestand der derzeitigen Situation besteht, liegt das Augenmerk naturgemäß stärker auf „worst case" Szenarien. Diese sind keineswegs als Prognosen zu verstehen, oft nicht einmal als sehr wahrscheinliche Entwicklungen, aber ihre Betrachtung ist erforderlich, um der Gesellschaft informierte Entscheidungen zu ermöglichen.

Die Hauptinformationsquellen für die IPCC Berichte sind nach Begutachtungsverfahren publizierte Artikel in internationalen wissenschaftlichen Zeitschriften. Wiewohl sogenannte „graue" Literatur[1] vom IPCC nicht grundsätzlich ausgeschlossen wird, kommt ihr doch auf der internationalen Ebene eine geringe Rolle zu. Im AAR14 wurde verstärkte auch auf graue Literatur zurückgegriffen, jedoch (wie beim IPCC auch) unter der Voraussetzung, dass sie zugänglich ist, oder zugänglich gemacht wurde. Das erschien auf nationaler Ebene in größerem Ausmaß notwendig, weil Untersuchungen zu lokalen und regionalen Fragen oft nicht in referierten Zeitschriften publiziert werden, zum Stand des Wissens über den Klimawandel in Österreich aber dennoch Wesentliches beitragen können. Als Nebeneffekt des AAR14 ist daher nicht nur eine Literaturdatenbank entstanden, die alle Literaturzitate des Berichtes enthält, sondern auch eine Sammlung grauer Literatur, die über das Climate Change Centre Austria (CCCA) auch weiterhin zugänglich sein wird.

Ebenso haben die AutorInnen das übersetzte IPCC Glossar (aus dem IPCC AR4) an die Bedürfnisse des AAR14 angepasst und teilweise wesentlich erweitert. Ein gutes Beispiel dafür ist der Themenkreis „Boden" der im IPCC Bericht wesentlich weniger ausführlich behandelt wird und daher im Glossar ungenügend berücksichtigt war. Das APCC Glossar wird vom CCCA als lebendes Dokument weitergeführt und online verfügbar gemacht.

Der Volltext des Austrian Assessment Report 2014, AAR14, ist in 3 Bände gegliedert. Band 1 widmet sich den physikalischen Grundlagen des Klimawandels, Band 2 den Auswirkungen, und Band 3 der möglichen Minderung von Treibhausgasemissionen und der Anpassung an den Klimawandel. Jeder der drei Bände wurde von zwei bis vier Co-Chairs betreut. Ihre Aufgabe war es, sicherzustellen, dass die einzelnen Kapitel keine wesentlichen Überschneidungen, Lücken, Inkonsistenzen, etc. aufweisen. Gemeinsam bilden die Co-Chairs der drei Bände das „Austrian Panel on Climate Change" (APCC).

Diese Gliederung des AAR14 weicht von jener des IPCC AR5 insofern ab, als sich die Anpassungsmaßnahmen dort im zweiten Band zusammen mit den Auswirkungen des Klimawandels finden, weil Anpassung vor allem in natürlichen Systemen oft schwer von den Auswirkungen zu trennen ist. Dies war dem APCC bewusst, doch schien diesem wichtiger, dass Anpassungs- und Minderungsmaßnahmen nicht völlig von einander losgelöst betrachtet werden, da dies zu fehlgeleiteten Maßnahmen führen kann.

Jeder der Bände ist in 5 bis 6 Kapitel gegliedert. Für jedes Kapitel des Berichtes wurden zwei bis drei thematisch komplementäre, koordinierende LeitautorInnen bestimmt und vom Panel bestätigt, die ihrerseits KollegInnen einluden, Teile des Kapitels zu schreiben (LeitautorInnen), oder einzelne Beiträge zu liefern (Beitragende AutorInnen). Die koordinierenden LeitautorInnen organisierten die Arbeit innerhalb ihres Kapitels mit allen jenen, die bereit waren, einen Beitrag zu leisten. Sie tragen die Verantwortung für Inhalt und Fertigstellung der einzelnen Kapitel. Diese Organisation bzw. Hierarchie von AutorInnen entspricht ebenso der IPCC Praxis.

Der erste und – nach Feedback und Review überarbeitete – zweite Entwurf jedes Kapitels wurden jeweils einem anonymen externen Begutachtungsprozess unterzogen, ähnlich dem Peer-Reviewprozess von wissenschaftlichen Zeitschriften. Alle Kommentare und - im Falle des zweiten Entwurfes - auch die Antworten der AutorInnen wurden dokumentiert. Ähnlich dem IPCC Prozess stellten namentlich bekannte Review EditorInnen angemessene Reaktionen der AutorInnen auf jeden einzelnen Kommentar sicher. Anders als beim IPCC Bericht wurde die Regierung bzw. die Politik in den Begutachtungsprozess nicht explizit eingebunden, sehr wohl jedoch auch deren Feedbacks als Stakeholder zweimal eingeholt (siehe dazu auch im Folgenden).

Die Synthese stellt eine Zusammenfassung des Volltextes dar. Für sie zeichnet ein Redaktionsteam verantwortlich, das auf Basis von Beiträgen der koordinierenden LeitautorInnen eine geschlossene Darstellung der Ergebnisse erstellt hat.

---

[1] „Graue Literatur" fasst das Ergebnis wissenschaftlicher Forschung zusammen, die nicht (oder noch nicht) einem Peer-Review-Prozess einer wissenschaftlichen Zeitschrift unterworfen wurde.

Die kürzeste Fassung, die Zusammenfassung für Entscheidungstragende, ist ebenfalls von einem Redaktionsteam auf Basis der Kernaussagen der einzelnen Kapitel entworfen worden, anschließend in einem Arbeitstreffen und mehrfachen Iterationsschleifen im Kreis der koordinierenden LeitautorInnen und vielen LeitautorInnen überarbeitet worden und letztendlich wieder vom Redaktionsteam finalisiert worden. Während die Zusammenfassung für Entscheidungstragende des IPCC Satz für Satz zwischen Wissenschaft und Politik ausgehandelt wird und das letztendlich veröffentlichte Papier dadurch politische Mächtigkeit erlangt, wurden politische Akteure in den AAR14 nach ausführlichen Diskussionen im APCC nur über zwei Stakeholder Workshops und das Angebot die Entwürfe zu kommentieren, eingebunden. Dies erschien dem APCC für einen kleinen Staat mit vielfältigen Abhängigkeiten wissenschaftlicher Institutionen und mit geringer Tradition in der Interaktion Wissenschaft-Politik als angemessene Vorgangsweise. Die Einbindung der Politik unterscheidet sich daher wesentlich von jener im IPCC Prozess.

Analog dem IPCC Bericht wurde die umfangreiche inhaltliche Arbeit von den Forschenden bzw. deren Institutionen unentgeltlich geleistet.

Erstellung des Sachstandsberichtes

Der Sachstandsbericht Klimawandel (AAR14) ist das Kernprodukt des im Rahmen des Austrian Climate Research Program (ACRP) des Klima- und Energiefonds (KLIEN) geförderten Projektes „Austrian Panel on Climate Change Assessment Report“, das eine Laufzeit vom 01.7.2011 bis 31.10.2014 hat. Die Leitung des Projektes lag bei Nebojsa Nakicenovic (Technische Universität Wien); ein Organisationskomitee, bestehend aus Helga Kromp-Kolb (Universität für Bodenkultur, Wien), Nebojsa Nakicenovic (Technische Universität Wien), und Karl Steininger (Universität Graz) hat gemeinsam mit dem Leiter des Review Prozesses, Keywan Riahi (International Institute for Applied Systems Analysis, IIASA) das APCC Projekt gesteuert. Über das Projekt wurden koordinative Tätigkeiten und Sachleistungen finanziert, aber die umfangreiche inhaltliche Arbeit der Forscherinnen und Forscher und die koordinative Tätigkeit des Organisationskomitees wurden unentgeltlich geleistet. Lediglich den Co-Chairs und den Koordinierenden Leitautorinnen wurde ein kleiner, einheitlicher Betrag zur Finanzierung von Hilfsdiensten, wie etwa die Erstellung von Abbildungen und Tabellen, oder die Unterstützung bei der Koordination der AutorInnen zur Verfügung gestellt. Der Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (FWF) hat einen Beitrag zur Drucklegung des Berichtes geleistet.

Die Einladung zur Mitwirkung an dem Projekt erging sowohl vor Projekteinreichung als auch nach Projektgenehmigung von der Projektleitung (Organisationskomitee) an die einschlägig Forschenden in Österreich, und nochmals von den Koordinierenden Leitautorinnen an die im jeweiligen Themenbereich Forschenden.

Potentielle künftige NutzerInnen des AAR14 aus Politik, Verwaltung, Zivilgesellschaft und Wirtschaft wurden in den Entstehungsprozess des AAR14 eingebunden, um deren Bedürfnissen möglichst gerecht zu werden. Die Stakeholder wurden zunächst zur vorgesehenen Struktur und Inhalt des Berichtes gefragt, und wieder als die vorläufigen Ergebnisse vorlagen (zweiter Entwurf). In beiden Fällen wurden jeweils Stakeholder-Konferenzen abgehalten und die Vorschläge und Kommentare der NutzerInnen anschließend durch die AutorInnen geprüft und soweit möglich und als innerhalb des APCC Rahmens als umsetzbar erachtet, in der weiteren Ausarbeitung berücksichtigt.

Ein Scientific Advisory Board (SAB), bestehend aus internationalen ExpertInnen, wurde zur Begleitung des Projektes eingerichtet.

Im Laufe der Arbeit hat sich allerdings gezeigt, dass beträchtliche zentrale Unterstützung für den Fortgang der Arbeit unentbehrlich war, worauf das Projektsekretariat wesentliche Aufgaben übernahm, die ursprünglich den Koordinierenden LeitautorInnen zugedacht waren, während das Organisationskomitee des ACRP-Projektes den Co-Chairs bei der Wahrnehmung ihrer Aufgaben behilflich war bzw. Aufgaben übernahm, die ursprünglich für letztere vorgesehen waren.

Beim Entwurf des ACRP-Projektes hatte man sich am internationalen IPCC Prozess orientiert, wobei wohl zu wenig berücksichtigt wurde, dass der internationale Expertenpool sehr viel größer als der nationale ist und der nationale Prozess daher viel stärker von der zeitlichen Verfügbarkeit und der Prioritätensetzung einzelner WissenschafterInnen abhängig ist. Auch zeitlich begrenzter Ausfall einzelner ForscherInnen hatte daher wesentliche Auswirkungen auf den Fortschritt und die Qualität des gesamten Projektes.

Das ACRP-Projekt „Austrian Panel on Climate Change Assessment Report“ umfasst auch die Analyse des Entstehungsprozesses des Österreichischen Sachstandsberichtes Klimawandel. Dazu wird ein eigener anonymisierter „Meta-Bericht“ als Unterstützung für die Konzeption möglicher zukünftiger nationaler Sachstandsberichte erstellt.

Mitwirkende

Der AAR14 ist die gemeinsame Leistung zahlreicher Mitwirkender, die alle Wesentliches zu seinem Entstehen beigetragen haben. Es ist dem Organisationskomitee ein Anliegen, diese Leistungen zu würdigen:

Autorinnen und Autoren

Manche der rund 240 WissenschafterInnen haben einzelne Bände oder Kapitel koordiniert, andere haben einzelne Abschnitte, Absätze oder eine Graphik beigesteuert – ihrer aller Arbeit war für die Qualität des Berichtes entscheidend. Viele Koordinierende LeitautorInnen haben den Aufwand nicht gescheut, alle einschlägig in Österreich forschenden KollegInnen in die gemeinsame Arbeit einzubeziehen und einigen ist es gelungen, auch den Zeitplan einzuhalten. Manche haben kurzfristig während des Prozesses Verantwortung übernommen, um sichtbar gewordene Lücken zu schließen. Aus unterschiedlichen Gründen konnten nicht alle Koordinierenden LeitautorInnen bis zum Ende dabei bleiben – die meisten haben dennoch auf die eine oder andere Weise zum Gesamtwerk beigetragen.

Qualitätskontrolle

Keywan Riahi und Mathis Rogner, IIASA, haben in professioneller Weise den Begutachtungsprozess organisiert, und dafür über 70, weitgehend anonym bleibende, ehrenamtlich tätige ReviewerInnen zur Mitarbeit gewonnen. Durch über 2 900 Kommentare und Fragen haben diese wesentlich zur Qualitätsverbesserung des Berichtes beigetragen. Die 13 Review-EditorInnen haben sichergestellt, dass den Kommentaren und Fragen der ReviewerInnen angemessen Rechnung getragen wird. Mit großer Ausdauer hat Mathis Rogner, IIASA, Rückmeldungen von allen Beteiligten eingefordert, Kommentar-und-Antworten-Tabellen erstellt, mehr als 17 Telefonkonferenztermine zustande gebracht, bei denen offene Punkte zwischen Review-EditorInnen, Koordinierenden LeitautorInnen und Organisationskomitee ausdiskutiert werden konnten, und auch sonst auf vielfältige Weise den Prozess vorangebracht.

Projektmanagement

Bei Laura Morawetz, BOKU, sind mit der Zeit alle Fäden zusammengelaufen. Fast unmerklich hat sie das Heft in die Hand genommen und die im Antrag bedauerlicherweise nicht vorgesehene Position der Projektmanagerin wahrgenommen. Trotz verwirrender Vielfalt an übermittelten Text- und Abbildungsversionen, Anfragen unterschiedlichster Art und immer wieder nicht eingehaltener Zeitpläne hat sie nie die Geduld und Übersicht verloren und vorausschauend auch das Organisationskomitee auf notwendige nächste Schritte hingewiesen. Ohne ihre unermüdliche und stets freundliche Ermutigung unterstützungsbedürftigen und selbst säumigen PartnerInnen gegenüber wäre dieser Bericht nicht fertig geworden. Wo immer Not an Mann oder Frau war, ist sie eingesprungen.

Projektsekretariat

Julian Matzenberger, TU Wien, hat die Verträge mit den Partnerinstitutionen aufgesetzt, die Homepage erstellt, wichtige Anleitungen für AutorInnen aus dem IPCC und GEA (Global Energy Assessment) Prozess an die AAR14 Bedürfnisse angepasst und bis Anfang 2014 die offiziellen Kontakte zur KPC gepflogen. Matthias Themeßl, CCCA, hat das Glossar erweitert und betreut, und die Literaturdatenbank aufgesetzt. Heidi Leitner, BOKU, hat sich um die Fertigstellung der Second Order Drafts verdient gemacht, und gemeinsam mit Iouli Andreev, Irene Schicker (BOKU) und Simon De Stercke (IIASA) die Literaturdatenbank befüllt, Kopien zitierter grauer Literatur gesammelt und gemeinsam mit Laura Morawetz für weitgehende Vereinheitlichung der Literaturverzeichnisse gesorgt. Die aufwändige Zusammenstellung der Originalgraphiken in mehreren Iterationen und das Einholen aller Copyrights oblag Benedikt Becsi (BOKU, TU Wien). Pat Wagner unterstützte von Seiten der IIASA Koordination und Kommunikation innerhalb des Organisationskomitees. Olivia Koland und Brigitte Wolkinger (Uni Graz) haben die Workshops und Review-Prozesse mit den Stakeholdern vorzüglich organisiert, den jeweiligen Informationsfluss sichergestellt und Kontakte

weiter betreut, und die Second Order Draft-Versionen der Kapitel dafür mit aufbereitet. In den letzten Wochen ist Bano Mehdi (IIASA) zum Team dazu gestoßen und hat sehr effizient wichtige Lücken gefüllt, sei es die Übersetzung der Zusammenfassung für Entscheidungstragende, die Klärung offener Fragen zu Abbildungen oder die Erstellung von Vorlagen für die Titelei.

LektorInnen

Thomas Reithmayer, Matthias Litschauer, Thomas Gerersdorfer, Heidi Leitner und Huem Otero haben (unter teilweise auch knappen Zeitvorgaben) Manuskripte des ersten Entwurfes jedes Kapitels lektoriert. Mit bewundernswerter Flexibilität haben sie sich den – aufgrund stochastisch eingehender Manuskripte – stets wechselnden Zeitplänen angepasst. Thomas Reithmayer und Matthias Litschauer waren dann für das finale Lektorat der einzelnen Kapitel, der Synthese und der Zusammenfassung für Entscheidungstragende verantwortlich. Obwohl ursprünglich ganz andere Zeiträume für das finale Lektorieren vorgesehen waren, hat es vor allem Thomas Reithmayer ermöglicht, durch jonglieren seiner anderen Verpflichtungen Wartezeiten für die APCC Autorinnen auf ein Minimum zu reduzieren. Mathis Rogner hat, wo nötig, die englischen Übersetzungen von Kapitelüberschriften, Bildtexten und Kurzfassungen lektoriert und sprachlich überarbeitet.

Layouterteam

Das Layouterteam (Valerie Braun, Kati Heinrich, Tobias Töpfer) des Institutes für Interdisziplinäre Gebirgsforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften unter der Leitung von Axel Borsdorf hat nicht nur sehr professionelle Layout-Arbeit unter teilweise knappen Zeitvorgaben geleistet, sondern ist dem Organisationskomitee auch hinsichtlich Verlag und Druck mit Rat und Tat zur Seite gestanden. Mit großer Selbstverständlichkeit haben die KollegInnen bis dahin übersehene Fehler ausgebessert, Abbildungen und Tabellen lesbarer gemacht, und eine zusätzliche Letztkontrolle des Gesamtwerkes vorgenommen, die sonst wohl unterblieben wäre. Die Erstellung eines ansprechenden Druckwerkes war ihnen sichtbar ein Anliegen. Auch als die fristgerechte Fertigstellung des Berichtes schon unmöglich erschien, arbeiteten sie unbeirrt weiter, reagierten freundlich auf immer neue Änderungswünsche seitens der APCC-Community und machten schließlich das Unmögliche doch möglich.

Scientific Advisory Board

Jill Jäger als SAB Vorsitzende hat in den ersten Phasen wichtigen und wertvollen Rat gegeben und den gesamten Prozess wohlwollend begleitet. Sie war ermutigend oder mahnend, jeweils zur richtigen Zeit und war ein sicherer Anker in dem bewegten Projektverlauf. Die beide weiteren Mitglieder des SAB, Daniela Jacob und Dirk Messner haben sich mit dankenswerter Geduld und äußert flexibel den sich ändernden Anforderungen angepasst und alle drei haben wertvolle Ratschläge für die Synthese und die Zusammenfassung für Entscheidungstragende gegeben. Jenen Anregungen, die nicht mehr im Werk selbst berücksichtigt werden konnten, wurde zumindest in der untenstehenden kritischen Reflexion Rechnung getragen, damit sie beim nächsten AAR berücksichtigt werden können.

Projektkonzept

Ganz am Beginn des Projektes stand Sebastian Helgenberger (BOKU), der bei der Erstellung des Antrages an den KLIEN / ACRP Wesentliches beigetragen und Kernelemente der Projektstruktur entwickelt hat. Er hat im Antrag auch bereits das Meta-Projekt angelegt, das es nun ermöglicht auch die (durchaus erwartbaren) Abweichungen zwischen der Theorie des Ablaufes, der sich am internationalen IPCC Prozess orientierte, und der Praxis auf nationaler Ebene zu dokumentieren und zu analysieren.

Institutionelle Unterstützung

Über 50 wissenschaftliche Einrichtungen ermöglichten ihren MitarbeiterInnen dankenswerterweise die ehrenamtliche Mitwirkung an der Erstellung und Qualitätssicherung des AAR14 und haben durch ihre wohlwollende Unterstützung entscheidend zum Sachstandsbericht beigetragen.

Das Institut für Gebirgsforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften ermöglichte großzügigerweise dem Layouterteam die volle Konzentration auf die Fertigstellung des Werkes und stellte seine beträchtliche Erfahrung bei der Herausgabe von Büchern zu Verfügung.

Besonders zu erwähnen ist die Unterstützung der Technischen Universität Wien, der Universität für Bodenkultur Wien, der Universität Graz und der IIASA, die es dem Organisationskomitee ermöglicht haben, wesentlich mehr Zeit in das Projekt zu investieren, als vorhergesehen. Diese vier Institutionen, in besonderem Ausmaße jedoch die Technische Universität Wien, die Universität für Bodenkultur und die IIASA haben darüber hinaus MitarbeiterInnen für das Sekretariat und die Qualitätskontrolle aus eigenen Mitteln finanziert, die Universität für Bodenkultur zusätzlich das Projektmanagement.

Der Klima- und Energiefonds (KLIEN) hat im Rahmen des Austrian Climate Research Programs das Projekt APCC und damit verbundene koordinierende Arbeit unterstützt. Die fachliche Arbeit und die koordinierende Tätigkeit der Wissenschaftler, einschließlich des Organisationskomitees, erfolgten ehrenamtlich. Dennoch, ohne die Unterstützung und den Rahmen des KLIEN/ACRP wäre der AAR14 nicht entstanden. Der KLIEN hat sich auch bereit erklärt, gemeinsam mit dem Climate Change Centre Austria bei der Dissemination des Berichtes behilflich zu sein.

Die KPC als abwickelnde Stelle, insbesondere Biljana Spasojevic als Kontaktperson, war entgegenkommend bei Spezialwünschen, die mit dem etwas aus dem Rahmen der üblichen Forschungsprojekte fallenden Vorhaben einhergingen.

Der FWF hat innerhalb eines knapp bemessenen Zeitrahmens einen in finanzieller Hinsicht wichtigen Druckkostenbeitrag genehmigt, und darüber hinaus mit der dieser Bewilligung vorangehenden Prüfung den wissenschaftlichen Qualitätssicherungsprozeß bestätigt, dem das vorliegende Werk unterworfen war.

Der ÖAW Verlag erwies sich als sehr geduldig und hilfreich hinsichtlich unserer vielen Fragen, und war äußerst flexibel angesichts eines sich mehrfach verschiebenden Liefertermins für das Manuskript.

Das Climate Change Centre Austria (CCCA) wird, nach Abschluss des Projektes, die Produkte (AAR14, Literaturdatenbank, Glossar, etc.) in seine Obhut übernehmen, verfügbar halten und weiterführen. Das CCCA könnte, möglicherweise, der Träger des nächsten Österreichischen Sachstandsberichtes Klimawandel sein.

Öffentliche Verwaltung

Das Projekt war durchgängig mitgetragen durch die ideelle Unterstützung und die Bestärkung des Bewusstseins des Bedarfs der öffentlichen Verwaltung nach diesem Assessment Report. Allen voran ist die Sektion «Umwelt und Klimaschutz» des Bundesministeriums für Land-, Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft zu nennen. Praktische Unterstützung erfuhr das Projekt auch durch die beiden, damals noch getrennten Bundesministerien für Wissenschaft und Forschung und für Wirtschaft, durch das Bundesministerium für Äußeres, das Bundesministerium für Verkehr, Infrastruktur und Technologie und das Bundeskanzleramt.

PartnerInnen, Familien, FreundInnen und KollegInnen

Nicht zuletzt seien die Angehörigen, FreundInnen und nicht direkt beteiligten KollegInnen aller Mitwirkenden erwähnt, die zweifellos phasenweise unter deren zeitenger, teils sehr anspruchsvoller Beschäftigung mit dem AAR14 gelitten haben. Die Mitwirkung an IPCC Berichten soll Ehen gefährdet oder zerstört haben – das konnte beim APCC vermieden werden, aber die Geduld des Umfeldes vieler der Beteiligten – vor allem jener in den zentralen Positionen, denen in der letzten Phase Dauereinsatz abverlangt wurde – darf nicht unerwähnt bleiben.

Ihnen allen sei an dieser Stelle seitens des Organisationskomitees sehr herzlich gedankt.

Qualitätssicherung

In einem mehrstufigen Verfahren wurden zuerst Struktur und Inhalt des Gesamtwerkes erarbeitet, dann für jedes einzelne Kapitel genauer ausgearbeitet und die einzelnen Kapitel auf einander abgestimmt.

Für die Qualitätssicherung und die Organisation des Review-Prozesses zeichnete die IIASA verantwortlich. Jedes der 17 Kapitel wurde zweimal einem umfassenden Review unterzogen.

Ein „First Order Draft“ (FOD) wurde einem ersten, teilweise internen, jedenfalls aber anonymen Review unterzogen. Die für den Qualitätssicherungsprozess zuständige IIASA sammelte die Kommentare und stellte diese in anonymer Form den Koordinierenden LeitautorInnen zur Verfügung. Letztere beantworteten die Kommentare und ließen diese und andere Verbesserungen und Erweiterungen in einen „Second Order Draft“ (SOD) einfließen.

Für jedes Kapitel in seiner Version als SOD wurden von der IIASA zwischen 3 und 6 internationale ReviewerInnen gewonnen, auch AutorInnen anderer Kapitel und TeilnehmerInnen des Stakeholderprozesses waren zusätzlich weiterhin zum Review eingeladen. Die anonymisierten Kommentare – zwischen 40 und 500 pro Kapitel – wurden gesammelt und wiederum den Koordinierenden LeitautorInnen zugestellt. In einer Tabelle wurde zu jedem Kommentar festgehalten, wie er abgearbeitet wurde – ob er umgesetzt, teilweise umgesetzt, oder abgelehnt wurde (in letzterem Fall mit Begründung warum).

Eine/ein Review EditorIn pro Kapitel überprüfte, ob die Kommentare und Anmerkungen zufriedenstellend behandelt wurden und erläuterte anschließend in einer oder mehreren Telefonkonferenzen den Koordinierenden LeitautorInnen seinen/ihren Befund. Co-Chairs und Mitglieder des Organisationskomitees nahmen ebenfalls an den Telefonkonferenzen teil, um Konsistenz in der Vorgangsweise zwischen den Kapiteln zu gewährleisten. In den meisten Fällen genügte eine Iteration und nachfolgende Ausarbeitung um die Freigabe des Kapitels durch die/den Review EditorIn zu erreichen. Die Tabellen mit den Kommentaren und Antworten sind einsehbar, um die nötige Transparenz zu gewährleisten.

Mit der schriftlichen Bestätigung der inhaltlichen Freigabe durch die Review-EditorInnen (sign-off-letter) konnte der Text ans Lektorat und anschließend zum Layoutieren weitergeleitet werden. Nach jedem Schritt erfolgte eine Kontrolle durch die Koordinierenden LeitautorInnen, die letztlich die Verantwortung für ihr jeweiliges Kapitel tragen.

Kritische Reflexion

Selbstverständlich weist der aus unserer Sicht sehr gelungene Sachstandsbericht auch Schwächen auf. Einige davon sind uns schmerzlich bewusst. Dieser Bericht ist der erste Klimasachstandsbericht für Österreich, der einzige in der Intention vergleichbare Bericht wurde von der Akademie der Wissenschaften, Kommission Reinhaltung der Luft 1989–1992 erstellt. Bei jenem Bericht wurde von etwa einem Dutzend Fachleuten das aktuelle Wissen über den Klimawandel in Österreich zusammengetragen. Der AAR14 hatte demgegenüber neben der Erstellung eines Berichtes über einen zwischenzeitlich wesentlich umfangreicheren Sachstand auch das Ziel, die in Österreich auf dem Gebiet des Klimawandels, seiner Ursachen und Auswirkungen sowie zu den Anpassungs- und Mitigationsmaßnahmen Forschenden zusammenzuführen, um über verstärkten fachlichen Austausch Kapazität und Qualität der Klimaforschung in Österreich zu erhöhen. Deswegen wurde bei der Erstellung bewusst das Konzept des IPCC übernommen: Ein offener Prozess, bei dem erfahrene WissenschafterInnen als Verantwortliche für einzelne Kapitel sich bemühen, alle einschlägig Forschenden entweder direkt als AutorInnen, oder indirekt über ihre Publikationen in das Werk einzubeziehen.

Dieses zweite Ziel ist nicht in allen Bereichen oder nicht ausreichend gut gelungen. Es gibt Kapitel und Subkapitel, bei denen die Verantwortlichen die Chance zu nutzen wussten, gemeinsam an einer Publikation zu arbeiten und im Konsens der einschlägig Forschenden wurde das vorhandene Wissen innerhalb des begrenzten Platzes bestmöglich und umfassend dargestellt. Es gab aber – als anderes Extrem – auch Kapitel, in denen (zumindest zunächst) vorwiegend das eigene Werk bzw. jenes der eigenen Institution dargestellt wurde. In Einzelfällen wurden auch implizit einschränkende Grundansätze gewählt, die dazu führten, dass zahlreiche Arbeiten ausgeschlossen blieben, etwa dass in einem der Kapitel nur Arbeiten berücksichtigt werden, die ganz Österreich umfassen, nicht aber solche, die sich nur auf Teilregionen beziehen, oder in einem anderen Kapitel nur Arbeiten, die in das offizielle staatliche Berichtsschema fallen. In Einzelfällen mögen auch ausgeprägte persönliche Präferenzen eine Rolle gespielt haben. Im Zuge des mehrstufigen Reviewprozesses konnte in den meisten Fällen noch eine gewisse Öffnung bewirkt werden, doch konnte ein echtes, gemeinsames Assessment, bzw. die völlige Befreiung von den einschränkenden Voraussetzungen nicht mehr in allen Fällen erreicht werden. Wo es möglich war, wurde wenigstens versucht, solche Einschränkungen explizit zu machen. All jene Kolleginnen und Kollegen, deren Arbeiten solcherart nicht die gebührende Berücksichtigung fanden, bitten wir um Nachsicht. Wir laden Sie jedoch herzlich ein, uns auf diese Arbeiten aufmerksam zu machen, damit sie in die Datenbank des CCCA aufgenommen werden können und damit gegen dasselbe Versehen bei einer nächsten Auflage vorgebaut werden kann.

Zu Recht wurde von Gutachtern eingemahnt, dass Begriffe, Klassifizierungen, Gliederungen oder ähnliche gesamtheitliche Aspekte nicht immer systematisch durch alle Kapitel durchgezogen wurden. Dies ist auf die parallele Arbeit der verschiedenen

AutorInnenteams zurückzuführen und die Schwierigkeit des Abgleiches, wenn nicht alle Kapitel zeitgerecht und damit zeitgleich vorliegen.

Im ursprünglichen Ablaufplan war reichlich Zeit vorgesehen um nach Vorliegen aller Kapitel, das Gesamtwerk auf Konsistenz, Vollständigkeit und Duplizierungen hin zu überprüfen. Leider zeigte sich, dass Termintreue auf der internationalen Eben offenbar leichter zu erreichen ist, als auf der nationalen. So wurden die AAR14 Publikationen zwar im Sinne des Auftraggebers fristgerecht fertig, doch fehlte es an Zeit für umfassende Quervergleiche. Für Hinweise auf Inkonsistenzen sind wir daher dankbar.

Nicht durch den Entstehungsprozess bestimmt ist das Problem, dass die Originalliteratur, auf der Band 2 und Band 3 beruhen, es oft an Klarheit bezüglich der Klimaszenarien fehlen läßt, für welche die jeweiligen Aussagen gelten. Hier wird künftig das in Errichtung befindliche Klimadatenzentrum des CCCA, das definierte Klimaszenarien für Impaktforschung zur Verfügung stellen wird, eine gewisse Abhilfe schaffen.

In zwei Bereichen konnten Gutachterwünsche meist nicht erfüllt werden: Der eine betrifft ökonomische Kostenabschätzungen für Schäden, Anpassungs- oder Minderungsmaßnahmen. Derartige Studien liegen bisher für Österreich nur sehr vereinzelt vor. An einer Abschätzung der Kosten des Nicht-Handelns wird derzeit gearbeitet – aufgrund der zeitgleichen Erstellung konnten die Ergebnisse nicht mehr in den vorliegenden AAR14 aufgenommen werden. Darüber hinaus zeigen aber auch diese Ergebnisse, dass es in vielen Bereichen noch an Daten fehlt.

Der zweite Themenblock betrifft Politik und Governance. Der AAR14 enthält wenig zum Thema politischer Rahmenbedingungen, Kompetenzverteilung und Entscheidungsfindung in der Klimapolitik, Österreichs Rolle in der EU- und internationalen Politik, oder ähnliche institutionelle Fragen. Dies geht einerseits auf ein tatsächliches Forschungsdefizit in diesem Bereich zurück, ist aber möglicherweise auch eine Folge der anfangs beschlossenen Gliederung des Sachstandsberichtes, welche diese Fragestellungen eher als Querschnittsmaterie verstanden wissen wollte, die dann jedoch nicht systematisch durch die Kapitel durchgezogen wurde – nicht zuletzt ein Hinweis auf noch fehlende Interdisziplinarität in der Klimaforschung.

Ein Problem systemischer Art betrifft die Aufnahme konkreter Fallbeispiele für Entwicklungen in Richtung gesellschaftlicher Transformation: In den meisten Fällen sind diese Pioniere – seien es Firmen, Gemeinden oder Regionen – bisher nicht Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen. Sie entziehen sich damit weitgehend der Erfassung im AAR14, da weder exakte Beschreibungen der Vorhaben, noch Evaluierungen des bisherigen Erfolges vorliegen. Dies ist bedauerlich, denn gerade auf dieser Ebene geschieht in Österreich einiges, das zudem auch international interessant und jedenfalls der Analyse und Dokumentation wert wäre.

Es war ein Ziel des APCC Projektes, Forschungsdefizite zu erkennen, und damit eine Grundlage für einen österreichischen „Science Plan Klimawandel" zu schaffen. Der in den letzten Abschnitten jedes Kapitels dargestellte Forschungsbedarf und die obigen Absätze zu den Caveats des AAR14 werden zum Kern des beim CCCA in Arbeit befindlichen Science Plans beitragen.

Umgang mit Unsicherheit

Empirische Wissenschaft

Erkenntnistheoretisch ist ein strenger Beweis für den anthropogenen Klimawandel nicht möglich, weil sich die Klimaforschung als eine empirische Wissenschaft versteht, die auf Beobachtung und Erfahrung gründet. Da die Theorie der Klimabeeinflussung durch den Menschen bereits seit über 30 Jahren der wissenschaftlichen Überprüfung unterworfen war, ist sie als wesentlich wahrscheinlicher einzuschätzen als andere vorgebrachte Hypothesen und es ist sachlich gerechtfertigt, sie weiteren Betrachtungen sowie auch Entscheidungen zugrunde zu legen.

Ein wesentlicher Teil der Analysen vergangener Änderungen und der Großteil der Zukunftsprojektionen beruhen auf Modellberechnungen. Es ist angebracht, Modelle kritisch zu betrachten: Sie geben die Natur bzw. die Wirklichkeit nie vollständig wieder, sie können immer nur Teilaspekte simulieren. Es ist daher wichtig, Modelle mit Überlegung einzusetzen, und nur dann, wenn sie für den spezifischen Zweck validiert sind. Andererseits sind Modelle die einzige Möglichkeit, quantitative Aussagen über komplexe Zusammenhänge zu ermitteln. Sie sind daher als Werkzeug unentbehrlich.

Mit dem Übergang von naturwissenschaftlichen zu gesellschaftspolitischen und ökonomischen Aspekten, d. h. mit dem Übergang von Band 1 und großteils Band 2 zu Band 3, gewinnen normative Vorgaben immer mehr an Bedeutung. Es wird versucht, diese jeweils explizit zu machen, doch mag dies nicht überall gelungen sein, da viele Vorgaben schon derart in der Denkkultur verankert sind, dass sie nicht mehr auffallen.

All diesen Überlegungen zufolge ist es wichtig, Aussagen über den Klimawandel, seine Folgeerscheinungen und die Optionen für Maßnahmen durch die Angabe nachvollziehbarer Bewertungen zum Grad der (Un)sicherheiten der Aussagen zu ergänzen.

Bewertung der Unsicherheit nach Muster des IPCC[2]

Über das oben beschriebene grundsätzliche Problem empirischer Wissenschaften hinaus, können wissenschaftliche Aussagen aus verschiedenen Gründen unsicher sein. Unsicherheit entsteht zum einen durch einen Mangel an Information oder durch verschiedene Interpretationen sowohl dieser Informationen als auch darüber, was bekannt ist oder überhaupt bekannt sein kann. Unsicherheit kann viele Quellen haben, von bezifferbaren Fehlern in Daten bis hin zu mehrdeutig formulierten Konzepten und Terminologien oder unsicheren Projektionen über menschliches Verhalten. Unsicherheit kann deshalb entweder quantitativ angegeben werden, z.B. durch eine Auswahl von berechneten Werten aus verschiedenen Modellen, oder durch qualitative Aussagen, die das Urteil eines Expertenteams wiedergeben.

Der AAR14 ist um sorgfältige Kommunikation der Unsicherheiten bemüht – u. a. durch einen einheitlichen Umgang mit den Begrifflichkeiten, eine nachvollziehbare Darstellung und einheitliche Beschreibung und Evaluierung der wissenschaftlichen Beweise und ihrer Übereinstimmungen. Er folgt darin den Vorgaben des IPCC und orientiert sich hinsichtlich der deutschen Terminologie an der deutschsprachigen Übersetzung des IPCC Syntheseberichts 2007[3]. Der vom IPCC definierte Rahmen für den Umgang mit Unsicherheiten ist breit, da Material aus unterschiedlichen Disziplinen zu bewerten und eine Vielfalt an Ansätzen zu behandeln sind. Daten, Indikatoren und Analysen in den Naturwissenschaften sind im Allgemeinen von anderer Art als diejenigen, die bei der Bewertung von Technologieentwicklung oder in den Sozialwissenschaften herangezogen werden. Band 1 konzentriert sich auf erstere, Band 3 auf letztere, und Band 2 deckt Aspekte von beidem ab.

Zur Beschreibung von Unsicherheiten wird im gesamten Bericht ein einheitliches Konzept verwendet, das drei unterschiedliche Ansätze benutzt, von denen jeder eine bestimmte Sprache anwendet: Die Auswahl unter und innerhalb dieser drei Ansätze hängt sowohl vom Wesen der verfügbaren Daten ab als auch von der fachkundigen Beurteilung der Richtigkeit und Vollständigkeit des aktuellen wissenschaftlichen Verständnisses durch die AutorInnen.

Bei einer **qualitativen** Abschätzung wird Unsicherheit dadurch beschrieben, dass eine relative Einschätzung vermittelt wird für die Menge und Qualität an Beweisen (d. h. Informationen aus Theorie, Beobachtungen oder Modellen, die angeben, ob eine Annahme oder Behauptung wahr oder gültig ist) und für das Ausmaß an Übereinstimmung unter den Fachleuten (d. h. den Grad an Übereinstimmung in der Literatur zu einem bestimmten Ergebnis). Dies führt zu einer zweidimensionale Bestimmung der Unsicherheit. (Tabelle 1). Dieser Ansatz wird mit einer Reihe von selbsterklärenden Begriffen wie hohe Übereinstimmung, starke Beweislage; hohe Übereinstimmung, mittlere Beweislage; mittlere Übereinstimmung, mittlere Beweislage, usw. angewendet. Beide Dimensionen gemeinsam werden in ein Maß des „Vertrauens" zusammengeführt (Tabelle 1, Skala ganz rechts).

Tabelle1: Zweidimensionale Bestimmung des Vertrauensbereiches - Verwendete Begriffe im AAR14

Übereinstimmung (zu einzelnen Aussagen)			
	Hohe Übereinstimmung Schwache Beweislage	Hohe Übereinstimmung Mittlere Beweislage	Hohe Übereinstimmung Starke Beweislage
	Mittlere Übereinstimmung Schwache Beweislage	Mittlere Übereinstimmung Mittlere Beweislage	Mittlere Übereinstimmung Starke Beweislage
	Niedrige Übereinstimmung Schwache Beweislage	Niedrige Übereinstimmung Mittlere Beweislage	Niedrige Übereinstimmung Starke Beweislage
	Beweislage (Anzahl und Qualität unabhängiger Quellen)		

Vertrauensbereich

[2] Dieser Abschnitt, wie auch die Kommunikation der Unsicherheit selbst, ist stark an die IPCC Guidance Notes angelehnt (Mastrandrea, M.D., C.B. Field, T.F. Stocker, O. Edenhofer, K.L. Ebi, D.J. Frame, H. Held, E. Kriegler, K.J. Mach, P.R. Matschoss, G.-K. Plattner, G.W. Yohe, and F.W. Zwiers, 2010: Guidance Note for Lead Authors of the IPCC Fifth Assessment Report on Consistent Treatment of Uncertainties. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Available at <http://www.ipcc.ch>.)

[3] Klimaänderung 2007, Synthesebericht. Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen, Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, WMO/UNEP, 2008, ISBN 92-9169-122-4)

Die Vertrauensskala wird als quantitative Einschätzung von Unsicherheit mittels fachkundiger Beurteilung der Richtigkeit zugrundeliegender Daten, Modelle oder Analysen verstanden. Es wird die in Tabelle 2 beschriebene Skala angewandt, um die geschätzte Wahrscheinlichkeit für die Richtigkeit eines Ergebnisses auszudrücken.

Tabelle 2: Beschreibung der Richtigkeit - Verwendete Begriffe im AAR14

Terminologie	Vertrauensbereich (Grad des Vertrauens bezüglich der Richtigkeit)
sehr hohes Vertrauen	in mindestens 9 von 10 Fällen korrekt
hohes Vertrauen	in etwa 8 von 10 Fällen korrekt
mittleres Vertrauen	in etwa 5 von 10 Fällen korrekt
geringes Vertrauen	in etwa 2 von 10 Fällen korrekt
sehr geringes Vertrauen	in weniger als 1 von 10 Fällen korrekt

Ist hingegen eine vollumfänglich quantitative Bewertung möglich (d. h. liegen so viele Daten bzw. Modellergebnisse vor, dass auch die Wahrscheinlichkeit des Eintreffens einer bestimmten Aussage quantitativ angegeben werden kann), so werden die in Tabelle 3 angegebenen Wahrscheinlichkeitsbereiche verwendet, um die geschätzte Eintrittswahrscheinlichkeit auszudrücken. Die Wahrscheinlichkeit bezieht sich auf die Bewertung der Wahrscheinlichkeit eines gut definierten Ergebnisses, das eingetreten ist oder zukünftig eintreten wird. Sie kann aus quantitativen Analysen oder Expertenmeinungen abgeleitet werden.

Tabelle 3: Wahrscheinlichkeiten – Verwendete Begriffe im AAR14

Terminologie	Wahrscheinlichkeit des Eintretens des Ereignisses bzw. der Auswirkung
praktisch sicher	> 99 % Wahrscheinlichkeit
sehr wahrscheinlich	> 90 % Wahrscheinlichkeit
wahrscheinlich	> 66 % Wahrscheinlichkeit
wahrscheinlicher als nicht	> 50 % Wahrscheinlichkeit
etwa so wahrscheinlich wie nicht	33 %–66 % Wahrscheinlichkeit
unwahrscheinlich	< 33 % Wahrscheinlichkeit
sehr unwahrscheinlich	< 10 % Wahrscheinlichkeit
außergewöhnlich unwahrscheinlich	< 1 % Wahrscheinlichkeit

In Zusammenfassungen und Kernaussagen kann die Evaluierung und Beschreibung der Unsicherheiten auch vereinfachend zusammengefasst werden:

- Für Forschungsergebnisse (bzw. Kernaussagen) mit hoher Übereinstimmung zu einer einzelnen Aussage UND starker Beweislage die Anzahl und Qualität unabhängiger Quellen betreffend wird in der Regel der Vertrauensbereich („sehr hohes Vertrauen", Tabelle 2) angegeben.
- Für Ergebnisse mit hoher Übereinstimmung ODER starker Beweislage, wenn also nicht beides vorhanden ist, wird entweder der Vertrauensbereich oder eine Kombination der Bewertungen, also z. B. „starke Beweislage, mittlere Übereinstimmung", gemäß Tabelle 1 angewendet.
- Für Forschungsergebnisse (bzw. Kernaussagen), für die ausreichend Daten und Modellergebnisse vorliegen, sodass eine quantitative Wahrscheinlichkeit für das Zutreffen der Aussage angegeben werden kann, erfolgen Wahrscheinlichkeitsaussagen wie „sehr unwahrscheinlich", „sehr wahrscheinlich" oder „praktisch sicher".

Trotz dieser recht ausführlichen Vorgaben zur Beschreibung von Unsicherheiten, bleibt in der praktischen Handhabung Spielraum. Die Bewertungen in AAR14 sind daher – wie auch im IPCC Bericht – vermutlich nicht vollständig, aber doch weitgehend konsistent.

Wir freuen uns, das vorliegende Werk der Öffentlichkeit übergeben zu können. Diese umfassende Zusammenstellung von Forschungsergebnissen zum Klimawandel in Österreich, seinen Auswirkungen und relevanten Minderungs- und Anpassungsmaßnahmen möge für Entscheidungstragende in der Politik und Verwaltung, in Kommunen und in der Wirtschaft zu einer wertvollen Hilfe werden. Darüber hinaus hoffen wir damit einen Beitrag zum besseren Verständnis der Herausforderung Klimawandel zu leisten und so der österreichischen Klimapolitik neuen Aufschwung zu geben.

Das Organisationskomitee:

Helga Kromp-Kolb Nebojsa Nakicenovic Karl Steininger

Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014

Zusammenfassung für Entscheidungstragende

Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014

Zusammenfassung für Entscheidungstragende

Koordinierende LeitautorInnen der Zusammenfassung für Entscheidungstragende
Helga Kromp-Kolb
Nebojsa Nakicenovic
Karl Steininger

LeitautorInnen der Zusammenfassung für Entscheidungstragende
Bodo Ahrens, Ingeborg Auer, Andreas Baumgarten, Birgit Bednar-Friedl, Josef Eitzinger, Ulrich Foelsche, Herbert Formayer, Clemens Geitner, Thomas Glade, Andreas Gobiet, Georg Grabherr, Reinhard Haas, Helmut Haberl, Leopold Haimberger, Regina Hitzenberger, Martin König, Angela Köppl, Manfred Lexer, Wolfgang Loibl, Romain Molitor, Hanns Moshammer, Hans-Peter Nachtnebel, Franz Prettenthaler, Wolfgang Rabitsch, Klaus Radunsky, Jürgen Schneider, Hans Schnitzer, Wolfgang Schöner, Niels Schulz, Petra Seibert, Rupert Seidl, Sigrid Stagl, Robert Steiger, Johann Stötter, Wolfgang Streicher, Wilfried Winiwarter

Zitierweise
APCC (2014): Zusammenfassung für Entscheidungstragende (ZfE). In: *Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC),* Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich.

Inhalt

Einführung

Die zum Thema Klimawandel forschenden österreichischen Wissenschafterinnen und Wissenschafter haben in einem dreijährigen Prozess nach dem Muster der „IPCC-Assessment Reports" einen Sachstandsbericht zum Klimawandel in Österreich erstellt. Mehr als 240 Wissenschafterinnen und Wissenschafter stellen in diesem umfangreichen Werk gemeinsam dar, was über den Klimawandel in Österreich, seine Folgen, Minderungs- und Anpassungsmaßnahmen sowie zu zugehörigen politischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Fragen bekannt ist. Das Austrian Climate Research Program (ACRP) des Klima- und Energiefonds hat die Arbeit durch die Finanzierung koordinativer Tätigkeiten und Sachleistungen ermöglicht. Die umfangreiche inhaltliche Arbeit wurde von den Forscherinnen und Forschern unentgeltlich geleistet.

In der vorliegenden Zusammenfassung für Entscheidungstragende sind die wesentlichsten Aussagen wiedergegeben. Zunächst werden der globale Kontext, die Vergangenheit und Zukunft des Klimas in Österreich sowie eine Zusammenschau der wichtigsten Auswirkungen und Maßnahmen dargestellt. Der anschließende Teil geht dann etwas ausführlicher auf einzelne Sektoren ein. Genauere Ausführungen finden sich – in steigendem Detaillierungsgrad – im Synthesebericht und im vollständigen Werk (Austrian Assessment Report, 2014), die beide im Buchhandel und über das Internet erhältlich sind.

Unsicherheiten werden in Anlehnung an deren Berücksichtigung durch das IPCC mittels dreier verschiedener Ansätze zum Ausdruck gebracht, abhängig vom Wesen der verfügbaren Daten sowie der Art der Beurteilung der Richtigkeit und Vollständigkeit des aktuellen wissenschaftlichen Verständnisses durch die Autoren und Autorinnen. Bei einer **qualitativen** Abschätzung wird Unsicherheit auf einer zweidimensionale Skala dadurch beschrieben, dass eine relative Einschätzung gegeben wird, einerseits für die Menge und Qualität an Beweisen (d.h. Informationen aus Theorie, Beobachtungen oder Modelle, die angeben, ob eine Annahme oder Behauptung wahr oder gültig ist) und andererseits für das Ausmaß an Übereinstimmung in der Literatur. Dieser Ansatz wird mit den selbsterklärenden Begriffen hohe, mittlere, schwache Übereinstimmung sowie starke, mittlere und schwache Beweislage angewendet. Die gemeinsame Beurteilung in diesen beiden Dimensionen wird durch Vertrauensangaben auf einer fünf-stufigen Skala von „sehr hohes Vertrauen" bis „sehr geringes Vertrauen" beschrieben. Mittels fachkundiger Beurteilung der Richtigkeit der zugrundeliegenden Daten, Modelle oder Analysen werden Unsicherheiten welche auch **quantitativ** fassbar sind durch Wahrscheinlichkeitsangaben in acht Stufen von „praktisch sicher" bis „außergewöhnlich unwahrscheinlich" zur Bewertung eines gut definierten Ergebnisses, welches entweder bereits eingetreten ist oder zukünftig eintreten wird, angegeben. Sie können aus quantitativen Analysen oder Expertenmeinungen abgeleitet werden. Genauere Angaben dazu finden sich in der Einleitung des AAR14. Gilt eine demgemäß vorgenommene Beurteilung für einen ganzen Absatz befindet sie sich am Ende desselben, sonst steht sie bei der jeweiligen Aussage.

Die Forschung zum Klimawandel in Österreich hat in den letzten Jahren wesentlichen Auftrieb bekommen, getragen insbesondere vom Klima- und Energiefonds im Rahmen des ACRP, vom FWF und von EU Forschungsprogrammen sowie von Forschungsinstitutionen im Rahmen der Eigenfinanzierung. Dennoch sind noch zahlreiche weitere Fragen offen. Ähnlich wie auf internationaler Ebene wäre eine periodische Aktualisierungen des Sachstandsberichtes wünschenswert, damit sich Öffentlichkeit, Politik, Verwaltung, Wirtschaft und Forschung bei ihren langfristig wirksamen Entscheidungen bestmöglich auf den aktuellen Stand des Wissens stützen können.

Der globale Kontext

Mit Fortschreiten der Industrialisierung sind weltweit deutliche Veränderungen des Klimas zu beobachten. Die Temperatur ist beispielsweise im Zeitraum seit 1880 im globalen Mittel um fast 1 °C gestiegen. In Österreich betrug die Erwärmung nahezu 2 °C, die Hälfte davon ist seit 1980 eingetreten. Diese Veränderungen wurden überwiegend durch die anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen (THG) sowie andere menschliche Aktivitäten, welche die Strahlungsbilanz der Erde beeinflussen, verursacht. Der Beitrag durch die natürliche Variabilität des Klimas beträgt mit hoher Wahrscheinlichkeit weniger als die Hälfte. Der vergleichsweise geringe globale Temperaturanstieg seit 1998 ist wahrscheinlich auf natürliche Klimavariabilität zurückzuführen.

Ohne umfangreiche zusätzliche Maßnahmen zur Emissionsvermeidung ist bis zum Jahr 2100 im globalen Mittel ein Temperaturanstieg von 3–5 °C im Vergleich mit dem ersten Jahrzehnt des 20. Jahrhunderts zu erwarten (siehe Abbildung 1). Dabei spielen selbstverstärkende Prozesse, beispielsweise die Eis-Albedo-Rückkopplung oder die zusätzliche Freisetzung von THG durch das Auftauen von Permafrostböden in den arktischen Regionen, eine wichtige Rolle (vgl. Band 1, Kapitel 1; Band 3, Kapitel 1).[1]

[1] Der Volltext des AAR14 ist in drei Bände gegliedert, und innerhalb dieser wiederum in Kapitel. Bei Informationen und Verweisen auf Inhalte des AAR14, in dem die detaillierteren Informationen zu

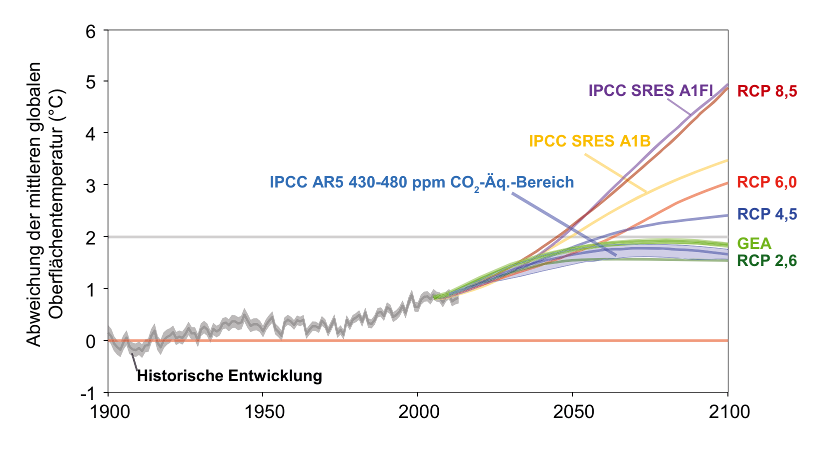


Abbildung 1 Abweichung der mittleren globalen Oberflächentemperatur (°C) vom Durchschnitt der ersten Dekade des 20. Jahrhunderts, historische Entwicklung sowie vier Gruppen von Zukunfts-Szenarien: zwei IPCC SRES Szenarien ohne Emissionsminderung (A1B und A1F1) die bei etwa 5 °C bzw. knapp über 3 °C Temperaturanstieg im Jahr 2100 liegen, vier neue Pfade mit Emissionsminderungsszenarien welche für IPCC AR5 entwickelt wurden (RCP8,5; 6,0; 4,5 und 2,6), 42 GEA-Emissionsminderungsszenarien und der Bereich all jener IPCC AR5 Szenarien welche die Temperatur bis 2100 bei maximal plus 2 °C stabilisieren; Datenquellen: IPCC SRES (Nakicenovic et al., 2000), IPCC WG I (2014) und GEA (2012)

Die Klimaänderung und ihre Folgen sind regional sehr unterschiedlich. Zum Beispiel wird im Mittelmeerraum ein markanter Rückgang der Niederschläge und somit auch der Wasserverfügbarkeit erwartet (vgl. Band 1, Kapitel 4). Der bei dem höchsten betrachteten Emissionsszenario wahrscheinliche Anstieg des mittleren Meeresspiegels in der Größenordnung 0,5–1 m bis Ende des Jahrhunderts gegenüber dem derzeitigen Niveau wird in zahlreichen dicht besiedelten Küstenregionen erhebliche Probleme bereiten (vgl. Band 1, Kapitel 1).

Da die Folgen eines ungebremsten anthropogenen Klimawandels so gravierend für die Menschheit wären, wurden bereits völkerrechtlich verbindliche Vereinbarungen zur Emissionsreduktion getroffen. Zusätzlich haben sich zahlreiche Staaten und Staatengruppen einschließlich der Vereinten Nationen („Sustainable Development Goals“), der Europäischen Union, der G-20, sowie Städte, andere Gebietskörperschaften und Unternehmen weitergehende Ziele gesetzt. In der Vereinbarung von Kopenhagen (UNFCCC Copenhagen Accord) und in den EU-Beschlüssen wird eine Begrenzung des globalen Temperaturanstiegs auf 2 °C im Vergleich zur vorindustriellen Zeit als notwendig erachtet, um gefährliche Auswirkungen des Klimawandels einzuschränken. Die von der Staatengemeinschaft auf freiwilliger Basis getroffenen Zusagen zur Emissionsminderung sind bisher jedoch bei weitem nicht ausreichend, um das 2 °C Ziel einzuhalten. Langfristig ist dazu eine nahezu vollständige Vermeidung von THG-Emissionen notwendig. Das bedeutet, die Energieversorgung und die Industrieprozesse umzustellen, die Entwaldung zu unterlassen sowie Landnutzung und auch Lebensstile zu verändern (vgl. Band 3, Kapitel 1; Band 3, Kapitel 6).

Die Wahrscheinlichkeit einer Erreichung des 2 °C-Zieles ist höher, wenn es gelingt bis 2020 eine Trendwende zu erreichen und im Jahr 2050 die globalen THG-Emissionen um 30–70 % unter dem Wert von 2010 liegen (vgl. Band 3, Kapitel 1; Band 3, Kapitel 6). Da die Industriestaaten für den größten Teil der historischen Emissionen verantwortlich sind, davon profitiert haben und auch wirtschaftlich leistungsfähiger sind, legt Artikel 4 der UNFCCC-Klimarahmenkonvention nahe, dass diese einen überproportionalen Anteil der globalen Reduktionsbeiträge erbringen sollen. Die EU sieht in ihrem „Fahrplan für den Übergang zu einer wettbewerbsfähigen CO_2-armen Wirtschaft bis 2050“ eine Reduktion ihrer THG-Emissionen um 80–95 % gegenüber dem Niveau von 1990 vor. Obwohl für diesen Zeitraum noch keine Reduktionsverpflichtungen der einzelnen Mitgliedstaaten festgelegt wurden, ist auch für Österreich von einer Verpflichtung zur Reduktion in dieser Größenordnung auszugehen (vgl. Band 3, Kapitel 1, Band 3, Kapitel 3).

Klimawandel in Österreich: Vergangenheit und Zukunft

In Österreich ist die Temperatur in der Periode seit 1880 um nahezu 2 °C gestiegen, verglichen mit einer globalen Erhöhung um 0,85 °C. Der erhöhte Anstieg ist speziell auch für die Zeit ab 1980 beobachtbar, in der dem globalen Anstieg von etwa 0,5 °C eine Temperaturzunahme von etwa 1 °C in Österreich gegenübersteht (praktisch sicher, (vgl. Band 1, Kapitel 3).

Ein weiterer Temperaturanstieg in Österreich ist zu erwarten (sehr wahrscheinlich). In der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts beträgt dieser etwa 1,4 °C (gegenüber dem derzeitigen Niveau) und ist wegen der Trägheit des Klimasystems sowie der Langlebigkeit von THG in der Atmosphäre vom jeweiligen Emissionsszenario nur wenig abhängig. Die Temperaturentwicklung danach wird sehr stark bestimmt durch die in den kommenden Jahren vom Menschen verur-

den hier im vorliegenden Dokument zusammengefassten Aussagen zu finden sind, wird dementsprechend die Nummer des Bandes und des jeweiligen Kapitels angegeben.

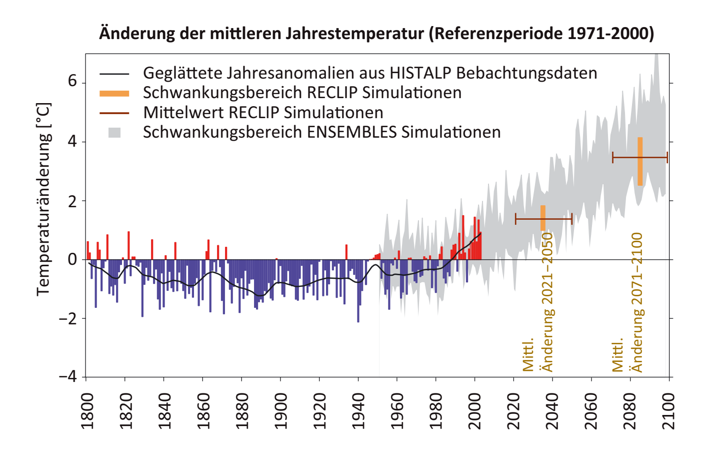


Abbildung 2 Mittlere Oberflächentemperatur (°C) in Österreich von 1800 bis 2100, angegeben als Abweichung vom Temperaturmittel der Periode 1971 bis 2000. Messungen bis zum Jahre 2010 sind in Farbe dargestellt, Modellberechnungen für ein IPCC-Szenario im höheren Emissionsbereich (IPCC SRES A1B Szenario) in Grau. Wiedergegeben sind Jahresmittelwerte (Säulen) und der über 20 Jahre geglättete Verlauf (Linie). Man erkennt die Temperaturabnahme bis knapp vor 1900 und den starken Temperaturanstieg (ca. 1 °C) seit den 1980er Jahren. Bis Ende des Jahrhunderts ist bei diesem Szenario ein Temperaturanstieg um 3,5 °C zu erwarten (RECLIP-Simulationen). Quelle: ZAMG

sachten THG-Emissionen und ist dementsprechend sowohl szenarienabhängig als auch wesentlich beeinflussbar (sehr wahrscheinlich, vgl. Band 1, Kapitel 4).

Die Niederschlagsentwicklung in den letzten 150 Jahren zeigt deutliche regionale Unterschiede: In Westösterreich wurde eine Zunahme der jährlichen Niederschlagsmenge um etwa 10–15 % registriert, im Südosten hingegen eine Abnahme in ähnlicher Größenordnung. (vgl. Band 1, Kapitel 3)

Im 21. Jahrhundert ist eine Zunahme der Niederschläge im Winterhalbjahr und eine Abnahme im Sommerhalbjahr zu erwarten (wahrscheinlich). Im Jahresdurchschnitt zeichnet sich kein deutlicher Trend ab. Großräumig liegt Österreich im Übergangsbereich zwischen zwei Zonen mit entgegengesetzten Trends – Zunahme in Nordeuropa, Abnahme im Mittelmeerraum (wahrscheinlich, vgl. Band 1, Kapitel 4)

In den letzten 130 Jahren hat die jährliche Sonnenscheindauer an den Bergstationen der Alpen um rund 20 % oder mehr als 300 Stunden zugenommen. Der Anstieg im Sommerhalbjahr war stärker als im Winterhalbjahr (praktisch sicher, vgl. Band 1, Kapitel 3). Zwischen 1950 und 1980 kam es durch eine Zunahme der Bewölkung und erhöhte Luftverschmutzung besonders in den Tallagen zu einer deutlichen Abnahme der Sonnenscheindauer im Sommer (vgl. Band 1, Kapitel 3).

Die Dauer der Schneebedeckung hat sich in den letzten Jahrzehnten vor allem in mittelhohen Lagen (um 1 000 m Seehöhe) verkürzt (sehr wahrscheinlich, vgl. Band 2, Kapitel 2). Da sowohl die Schneefallgrenze und damit der Schneedeckenzuwachs, als auch die Schneeschmelze temperaturabhängig sind, ist durch den weiteren Temperaturanstieg eine Abnahme der Schneedeckenhöhe in mittelhohen Lagen zu erwarten (sehr wahrscheinlich, vgl. Band 2, Kapitel 2).

Alle vermessenen Gletscher Österreichs haben im Zeitraum seit 1980 deutlich an Fläche und Volumen verloren. So hat z. B. in den südlichen Ötztaler Alpen, dem größten zusammenhängenden Gletschergebiet Österreichs, die Gletscherfläche von 144,2 km² im Jahre 1969 auf 126,6 km² im Jahre 1997 und 116,1 km² im Jahre 2006 abgenommen (praktisch sicher, vgl. Band 2, Kapitel 2). Die österreichischen Gletscher reagieren in der Rückzugsphase seit 1980 besonders sensitiv auf die Sommertemperatur, daher muss man von einem weiteren Rückgang der Gletscherfläche ausgehen (sehr wahrscheinlich, vgl. Band 2, Kapitel 2). Es ist mit einem weiteren Anstieg der Permafrostgrenze zu rechnen (sehr wahrscheinlich, vgl. Band 2, Kapitel 4).

Temperaturextreme haben sich markant verändert, so sind z. B. kalte Nächte seltener, heiße Tage aber häufiger geworden. Im 21. Jahrhundert wird sich diese Entwicklung verstärkt fortsetzen und damit wird auch die Häufigkeit von Hitzewellen zunehmen (sehr wahrscheinlich, vgl. Band 1, Kapitel 3; Band 1, Kapitel 4). Bei extremen Niederschlägen sind bis jetzt keine einheitlichen Trends nachweisbar (vgl. Band 1, Kapitel 3), Klimamodelle zeigen aber, dass starke und extreme Niederschläge wahrscheinlich von Herbst bis Frühling zunehmen werden (vgl. Band 1, Kapitel 4). Trotz einiger herausragender Sturmereignisse in den letzten Jahren kann eine langfristige Zunahme der Sturmtätigkeit nicht nachgewiesen werden. Auch für die Zukunft kann derzeit keine Veränderung der Sturmhäufigkeit abgeleitet werden (vgl. Band 1, Kapitel 3; Band 1, Kapitel 4).

Zusammenschau für Österreich: Auswirkungen sowie Maßnahmen

Die ökonomischen Auswirkungen extremer Wetterereignisse in Österreich sind bereits jetzt erheblich und haben in den letzten drei Jahrzehnten zugenommen (praktisch sicher, vgl. Band 2, Kapitel 6). Die in den letzten drei Jahrzehnten aufgetretenen Schadenskosten von Extremereignissen legen nahe, dass Veränderungen in der Frequenz und Intensität solcher Schadensereignisse signifikante Auswirkungen auf die Volkswirtschaft Österreichs hätten.

Die möglichen ökonomischen Auswirkungen des in Österreich erwarteten Klimawandels werden überwiegend

durch Extremereignisse und extreme Witterungsperioden bestimmt (mittleres Vertrauen, vgl. Band 2, Kapitel 6). Neben Extremereignissen führen auch graduelle Temperatur- und Niederschlagsänderungen zu ökonomischen Auswirkungen, z. B. in Form sich verändernder Ertragspotenziale in der Land- und Energiewirtschaft oder der Schneesicherheit von Schigebieten mit entsprechenden Auswirkungen auf den Wintertourismus.

In Gebirgsregionen nehmen Rutschungen, Muren, Steinschlag und andere gravitative Massenbewegungen deutlich zu (sehr wahrscheinlich, hohes Vertrauen). Dies ist auf veränderten Niederschlag, auftauenden Permafrost und Rückgang von Gletschern zurückzuführen, aber auch auf veränderte Landnutzung (sehr wahrscheinlich, hohes Vertrauen). Bergflanken werden etwa vulnerabler gegenüber Prozessen wie Steinschlag (sehr wahrscheinlich, hohes Vertrauen, vgl. Band 2, Kapitel 4) und Bergstürzen (wahrscheinlich, mittleres Vertrauen, vgl. Band 2, Kapitel 4). Bisher durch Permafrost fixierte Schuttmassen werden durch Muren mobilisiert (sehr wahrscheinlich, hohes Vertrauen, vgl. Band 2, Kapitel 4).

Die Waldbrandgefahr wird in Österreich zunehmen. Aufgrund der erwartenden Erwärmungstendenz und der steigenden Wahrscheinlichkeit längerer sommerlicher Trockenperioden wird die Waldbrandgefahr zunehmen (sehr wahrscheinlich, hohes Vertrauen, vgl. Band 2, Kapitel 4).

Geänderte Sedimentfrachten in Flusssystemen sind feststellbar. In Wildbächen und in großen Flusssystemen sind durch Änderungen in der Wasserführung und im Geschiebehaushalt (Mobilisierung, Transport und Ablagerung) große Veränderungen zu erwarten (sehr wahrscheinlich, hohes Vertrauen, vgl. Band 2, Kapitel 4). Entscheidend ist hierbei die Trennung zwischen Veränderungen durch den Klimawandel und durch menschlichen Einfluss.

Durch die derzeit absehbare sozio-ökonomische Entwicklung und den Klimawandel steigen die klimawandelbedingten zukünftigen Schadenspotenziale für Österreich (mittleres Vertrauen, vgl. Band 2, Kapitel 3; Band 2, Kapitel 6)**.** Eine Vielzahl an Faktoren determiniert die künftigen Kosten des Klimawandels: Neben der möglichen Änderung in der Verteilung von Extremereignissen sowie graduellen Klimaänderungen sind es vor allem sozio-ökonomische und demografische Faktoren, die letztlich die Schadenskosten determinieren werden. Dazu gehören u.a. die Altersstruktur der Bevölkerung im urbanen Raum, die Werteexposition, der Infrastrukturausbau z. B. in durch Lawinen oder Muren gefährdeten Gebieten, sowie ganz allgemein die Landnutzung, die maßgeblich die Vulnerabilität gegenüber dem Klimawandel steuern.

Ohne verstärkte Anstrengungen zur Anpassung an den Klimawandel wird die Verletzlichkeit Österreichs gegenüber dem Klimawandel in den kommenden Jahrzehnten zunehmen (hohes Vertrauen, vgl. Band 2, Kapitel 6)**.** Veränderungen im Zuge des Klimawandels beeinflussen in Österreich vor allem witterungsabhängige Sektoren und Bereiche wie Land-, Forst-, Wasser-, Energiewirtschaft, Tourismus, Gesundheit und Verkehr sowie die diesen jeweils vor-, bzw. nachgelagerten Sektoren (hohes Vertrauen, vgl. Band 2, Kapitel 3). Es ist davon auszugehen, dass Anpassungsmaßnahmen die negativen Auswirkungen des Klimawandels abmildern, aber nicht vollständig ausgleichen können (mittleres Vertrauen, vgl. Band 3, Kapitel 1).

Um den Folgen des Klimawandels gezielt begegnen zu können, hat Österreich 2013 eine nationale Anpassungsstrategie verabschiedet (vgl. Band 3, Kapitel 1)**.** Die Wirksamkeit dieser Strategie wird vor allem daran gemessen werden, wie erfolgreich einzelne betroffene Sektoren bzw. Politikbereiche in der Entwicklung geeigneter Anpassungskonzepte und deren Umsetzung sein werden. Grundlagen für deren Evaluierung, wie z. B. eine regelmäßige Erhebung der Wirksamkeit von Anpassungsmaßnahmen nach dem Muster anderer Staaten, sind in Österreich noch nicht vorhanden.

Die THG-Emissionen Österreichs betrugen im Jahr 2010 in Summe etwa 81 Mt CO_2-Äquivalente (CO_2-Äq.) oder 9,7 t CO_2-Äq. pro Kopf (sehr hohes Vertrauen, vgl. Band 1, Kapitel 2)**.** Diese Zahlen berücksichtigen den emissionsmindernden Beitrag von Landnutzungsänderungen über die Kohlenstoffaufnahme von Ökosystemen. Die österreichischen pro-Kopf-Emissionen sind etwas höher als der EU-Schnitt von 8,8 t CO_2-Äq. pro Kopf und Jahr und deutlich höher als jene z. B. von China (5,6 t CO_2-Äq. pro Kopf und Jahr), jedoch viel niedriger als jene der USA (18,4 t CO_2-Äq. pro Kopf und Jahr) (vgl. Band 1, Kapitel 2). Österreich ist im Kyoto Protokoll Verpflichtungen eingegangen, seine Emissionen deutlich zu reduzieren. Nach Korrektur um jenen Teil der Kohlenstoffsenken, der laut den Vereinbarungen geltend gemacht werden konnte, lagen die Emissionen der Verpflichtungsperiode 2008 bis 2012 um 18,8 % über dem Reduktionsziel von 68,8 Mt CO_2-Äq. pro Jahr (vgl. Band 3, Kapitel 1).

Bezieht man auch die durch österreichischen Konsum im Ausland verursachten CO_2-Emissionen mit ein, so liegen die Emissionswerte für Österreich um etwa die Hälfte höher (hohes Vertrauen, vgl. Band 3, Kapitel 5). Österreich ist Mitverursacher der Emissionen anderer Staaten. Bezieht man diese Emissionen einerseits mit ein und bereinigt andererseits um die den österreichischen Exporten zurechenbaren

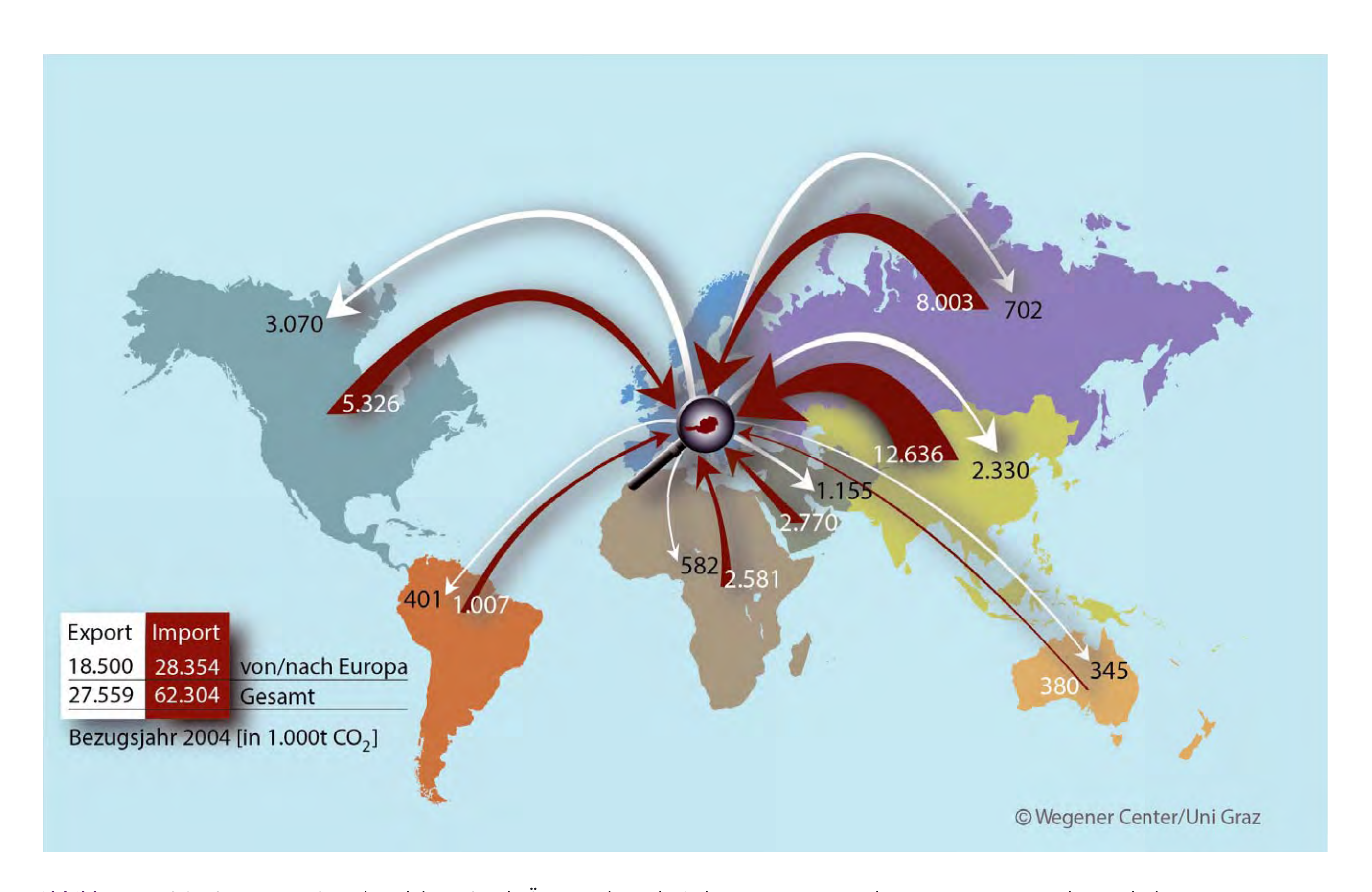


Abbildung 3 CO_2-Ströme im Güterhandel von/nach Österreich nach Weltregionen. Die in den Importgütern implizit enthaltenen Emissionen sind mit roten Pfeilen dargestellt, die in den Exportgütern enthaltenen, Österreich zugerechneten Emissionen mit weißen Pfeilen. In der Bilanz fallen Süd- und Ostasien, besonders China und Russland als Regionen auf, aus denen Österreich emissionsintensive Konsum- und Investitionsgüter importiert. Quelle: Munoz und Steininger (2010)

Emissionen, so erhält man die „Konsum-basierten" Emissionen Österreichs. Diese liegen deutlich über den im vorigen Absatz genannten und in der UNO-Statistik für Österreich ausgewiesenen Emissionen und zwar mit steigender Tendenz (1997 um 38 % höher, 2004 um 44 % darüber). Aus den Warenströmen lässt sich ableiten, dass österreichische Importe vor allem Emissionen in Süd- und Ostasien, besonders in China und Russland verursachen (siehe Abbildung 3).

Die nationalen THG-Emissionen sind seit 1990 gestiegen, obwohl sich Österreich unter dem Kyoto-Protokoll zu einer Minderung um 13 % für den Zeitraum 2008 bis 2012 gegenüber 1990 verpflichtet hat (sicher, vgl. Band 3, Kapitel 1; Band 3, Kapitel 6)**.** Das österreichische Ziel war im Vergleich zu anderen Industriestaaten relativ hochgesetzt. Die formale Erfüllung dieses Minderungsziels für 2008 bis 2012 wurde durch Zukauf von Emissionsrechten im Ausland im Ausmaß von insgesamt ca. 80 Mt CO_2-Äq. um mindestens 500 Mio. € erreicht (sehr hohes Vertrauen, vgl. Band 3, Kapitel 1).

In Österreich sind Bemühungen zur Verbesserung der Energieeffizienz und zur Förderung erneuerbarer Energieträger zu erkennen, zur Zielerreichung bezüglich erneuerbarer Energie und Energieeffizienz sind sie jedoch nicht genügend mit Maßnahmen hinterlegt**.** So wurde etwa in der 2010 veröffentlichten Energiestrategie vorgeschlagen, dass der Endenergieverbrauch 2020 das Niveau von 2005 in der Höhe von 1 100 PJ nicht übertreffen soll; dies ist jedoch noch nicht auf Maßnahmenebene implementiert. Im Ökostromgesetz werden Ziele der Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen von zusätzlich 10,5 TWh (37,8 PJ) pro Jahr bis 2020 festgeschrieben. Die Energiewirtschaft und die Industrie sind weitgehend im Rahmen des „*EU-Emissionshandels*" reguliert, über dessen weitere Ausgestaltung gegenwärtig verhandelt wird. Insbesondere auch im Verkehrssektor fehlen derzeit noch wirksame Maßnahmen.

Österreich hat sich bisher für den Klima- und Energiebereich lediglich kurzfristige Minderungsziele, nämlich für den Zeitraum bis 2020 gesetzt (vgl. Band 3, Kapitel 1; Band 3, Kapitel 6)**.** Das entspricht den verbindlichen EU-Vorgaben, doch haben andere Länder, der Problematik angemessen, auch längerfristige THG-Minderungsziele festgelegt.

Deutschland hat sich z. B. bis 2050 eine Minderung von 85 % zum Ziel gesetzt. Großbritannien beabsichtigt eine Reduktion um 80 % bis 2050. (vgl. Band 3, Kapitel 6)

Die bisher gesetzten Maßnahmen decken den von Österreich erwarteten Beitrag zur Erreichung des globalen 2 °C Ziel nicht ab (hohes Vertrauen, vgl. Band 3, Kapitel 1; Band 3, Kapitel 6). Die für Österreich definierten Maßnahmen orientieren sich an den Zielwerten für das Jahr 2020; die Ausbauziele für erneuerbare Energieträger sind für den österreichischen Beitrag zum 2 °C Ziel nicht ausreichend ambitioniert und werden wahrscheinlich weit vor 2020 erreicht, während es unwahrscheinlich ist, dass im Industrie- und Verkehrssektor eine tatsächliche Trendwende der Emissionen erreicht wird. beziehungsweise die bereits erfolgte Trendwende in den Emissionen aus Raumwärme ausreichend stark ausfallen wird (vgl. Band 3, Kapitel 3; Band 3, Kapitel 4). Die erwarteten Einsparungen von THG-Emissionen beim Ersatz fossiler Treibstoffe durch Biokraftstoffe werden zunehmend in Frage gestellt (vgl. Band 3, Kapitel 2).

Institutionelle, Wirtschafts-, Sozial- und Wissensbarrieren bremsen Fortschritte bezüglich Klimaschutz und Anpassung. Ansätze zur Beseitigung oder Überwindung dieser Barrieren umfassen eine Reform der Verwaltungsstrukturen in Hinblick auf die zu bewältigenden Aufgaben sowie eine Bepreisung von Produkten und Dienstleistungen entsprechend ihrer Klimawirkung. Wesentlich ist hierbei auch die Streichung klimaschädlicher Förderungen und Subventionen, etwa für die Exploration von neuen fossilen Reserven, der Pendlerpauschale – welche die Nutzung des PKWs begünstigt, oder auch der Wohnbauförderung für Einfamilienhäuser im städtischen Nahbereich. Auch eine starke Einbindung der Zivilgesellschaft und der Wissenschaft in Entscheidungsfindungsprozesse kann Maßnahmen beschleunigen. Handlungsrelevante Wissenslücken sollten geschlossen werden, weil sie auch bremsen, sie zählen aber nicht zu den dominanten Faktoren. (hohes Vertrauen, vgl. Band 3, Kapitel 1; Band 3, Kapitel 6).

Emissionsminderungen um bis zu 90 % bis 2050 können in Österreich, Szenarienberechnungen zufolge, durch zusätzliche Maßnahmen erzielt werden (hohes Vertrauen, vgl. Band 3, Kapitel 3; Band 3, Kapitel 6)**.** Diese Szenarien stammen aus Studien, die auf die Energiebereitstellung und -nachfrage fokussieren. Derzeit fehlt jedoch ein klares Bekenntnis der Entscheidungstragenden zu Emissionsminderungen in diesem Ausmaß. Österreich hat insbesondere großen Nachholbedarf in der Reduktion der Energieintensität, die sich in den EU-27 seit 1990 um 29 % verbessert hat, in Österreich aber praktisch unverändert geblieben ist.

Bei Halbierung des energetischen Endverbrauchs in Österreich können die von der EU für 2050 vorgegebenen Ziele für Österreich einigen Szenarien zufolge erreicht werden. Es wird erwartet, dass der dann verbleibende Energiebedarf durch erneuerbare Energieträger abgedeckt werden kann. Das wirtschaftlich nutzbare Potenzial an Erneuerbaren innerhalb Österreichs wird mit etwa 600 PJ quantifiziert. Dies steht einem Endenergieverbrauch von aktuell jährlich rund 1 100 PJ gegenüber (vgl. Band 3, Kapitel 3). Effizienzpotentiale bestehen v.a. in den Bereichen Gebäude, Verkehr und Produktion (hohes Vertrauen, vgl. Band 3, Kapitel 3)

Um rasch und ernsthaft eine Transformation zu einem klimaneutralen Wirtschaftssystem anzustreben, wird ein sektorübergreifend eng koordiniertes Vorgehen mit neuartigen institutionellen Kooperationen in einer integrativen Klimapolitik notwendig sein. Die einzelnen Klimaschutzmaßnahmen in den verschiedenen Wirtschafts- und Aktivitätsbereichen sind nicht ausreichend. Dabei sind auch Transformationen anderer Art zu berücksichtigen, wie etwa jene des Energiesystems, weil dezentrale Produktion, Speicherung und Steuerung für fluktuierende Energiequellen und internationaler Handel an Bedeutung gewinnen (mittleres Vertrauen, vgl. Band 3, Kapitel 3). Gleichzeitig treten zahlreiche kleine Anlagenbetreiber mit teilweise neuen Geschäftsmodellen auf den Markt.

Eine integrativ-konstruktive Klimapolitik trägt zur Bewältigung anderer aktueller Herausforderungen bei. So würden Wirtschaftsstrukturen etwa resistenter gegenüber Einflüssen von außen (Finanzkrisen, Energieabhängigkeit). Das bedeutet die Intensivierung von lokalen Wirtschaftskreisläufen, die Verringerung von internationalen Abhängigkeiten und eine viel höhere Produktivität aller Ressourcen, allen voran der energetischen. (vgl. Band 3, Kapitel 1)

Die Erreichung der Ziele für 2050 erscheint nur bei einem Paradigmenwandel in vorherrschenden Konsum- und Verhaltensmustern sowie den traditionell kurzfristig orientierten Politikmaßnahmen und Entscheidungsprozessen wahrscheinlich (hohes Vertrauen, vgl. Band 3, Kapitel 6). Nachhaltige Entwicklungspfade, die sowohl eine drastische Abkehr von historischen Trends als auch von individuellen, nur sektoral ausgerichteten Strategien und Geschäftsmodellen bedeuten, können zur erforderlichen THG-Minderung beitragen (wahrscheinlich, vgl. Band 3, Kapitel 6). Neue integrative Ansätze im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung erfordern nicht zwingend neuartige technologische Lösungen, sondern vor allem eine bewusste Umorientierung von etablierten, klimaschädlichen Gewohnheiten in Lebensstil und im Verhalten der wirtschaftlichen Akteure. Weltweit gibt es Initiativen für

Transformationen in Richtung nachhaltiger Entwicklungspfade, etwa die Energiewende in Deutschland, die Initiative „Sustainable Energy for All" der UNO, zahlreiche „Transition Towns" oder die „Slow Food"-Bewegung und die vegetarische Ernährungsweise. Erst die Zukunft wird zeigen, welche Initiativen erfolgreich sein werden (vgl. Band 3, Kapitel 6).

Nachfrageseitigen Maßnahmen wie Veränderungen in der Ernährungsweise kommt eine Schlüsselrolle im Klimaschutz zu. Umstellung der Ernährung auf eine regional und saisonal orientierte, überwiegend auf pflanzlichen Produkten beruhend, mit deutlich verringertem Konsum tierischer Produkte einhergehend, kann einen maßgeblichen Beitrag zur THG-Reduktion leisten (sehr wahrscheinlich, hohes Vertrauen). Auch die Verringerung von Verlusten im gesamten Lebenszyklus (Produktion und Konsum) von Lebensmitteln kann einen wichtigen Beitrag zur Reduktion von THG-Emissionen leisten (sehr wahrscheinlich, mittleres Vertrauen).

Die der Zielerreichung förderliche Veränderungen umfassen auch die Transformation wirtschaftlicher Organisationsformen und Ausrichtungen (hohes Vertrauen, vgl. Band 3, Kapitel 6)**.** Der Gebäudebestand hat einen hohen Erneuerungsbedarf; Neubau oder Renovierung können durch neue Finanzierungsmechanismen intensiviert werden. Das fragmentierte Verkehrssystem kann in Richtung eines integrierten Mobilitätssystems entwickelt werden. Im Bereich der Produktion geht es um neue Produkte, Prozesse und Werkstoffe, die zudem sicherstellen können, dass Österreich den Anschluss an den globalen Wettbewerb nicht verliert. Das Energiesystem kann in einer integrierten Perspektive mit dem Ausgangspunkt der Energiedienstleistungen ausgerichtet werden.

Durch geeignete politische Rahmenbedingungen kann die Transformation befördert werden (hohes Vertrauen, vgl. Band 3, Kapitel 1, Band 3, Kapitel 6)**.** Auch in Österreich besteht Bereitschaft zum Wandel. PionierInnen – Individuen, Firmen, Kommunen, Regionen – setzen ihre Vorstellungen bereits um, etwa im Bereich der Energiedienstleistungen oder der klimafreundlichen Mobilität und Nahversorgung. Derartige Initiativen können durch politische Maßnahmen, die ein unterstützendes Umfeld schaffen, gestärkt werden.

Neue Geschäfts- und Finanzierungsmodelle sind wesentliche Elemente der Transformation. Finanzierungsinstrumente (jenseits der bisher primär eingesetzten Förderungen) und neue Geschäftsmodelle betreffen vor allem den Umbau der energieverkaufenden Unternehmungen zu Spezialisten für Energiedienstleistungen. Die Energieeffizienz kann deutlich erhöht und rentabel gemacht werden, gesetzliche Verpflichtungen können die Gebäudesanierung vorantreiben, durch angepasste rechtliche Bestimmung können Gemeinschaftsinvestitionen in Erneuerbare- oder Effizienzmaßnahmen ermöglicht werden. Informationspolitik und Raumplanung können die Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel und emissionsfreien Verkehr erleichtern, wie sich beispielsweise in der Schweiz zeigt (vgl. Band 3, Kapitel 6). Langfristige Finanzierungsmodelle (bei Gebäuden z. B. über 30 bis 40 Jahre), die insbesondere durch Pensionsfonds und Versicherungen dotiert werden, können neue Infrastruktur ermöglichen. Die erforderliche Transformation hat globale Dimensionen, daher sind auch solidarische Leistungen im Ausland, wie die in der Klimarahmenkonvention vorgesehenen Fonds, zu diskutieren.

Größere Investitionen in Infrastruktur mit langer Lebensdauer begrenzen – wenn sie THG-Emissionen und Klimaanpassung außer Acht lassen – die Freiheitsgrade bei der Transformation zur Nachhaltigkeit. Wenn alle Projekte einen „climate-proofing" unterzogen werden, welches Klimaschutz und Klimaangepasstheit integrativ betrachtet, lassen sich sogenannte Lock-in-Effekte vermeiden, die langfristig emissionsintensive Pfadabhängigkeiten schaffen (hohes Vertrauen, vgl. Band 3, Kapitel 6). Der Bau von Kohlekraftwerken ist als ein Beispiel zu nennen. National zählen unter anderem die überproportionale Gewichtung des Straßenausbaus, die Errichtung von Gebäuden, welche nicht den heutigen mit vertretbarem Aufwand erreichbaren ökologischen Standards entsprechen und verkehrsinduzierende und mit hohem Flächenbedarf verbundene Raumordnungen sind andere.

Ein zentrales Transformationsfeld sind die Städte und verdichteten Siedlungsräume (hohes Vertrauen, vgl. Band 3, Kapitel 6). Die Synergiepotentiale in Städten, die in vielen Fällen auch zum Schutz des Klimas genutzt werden können, rücken zunehmend ins Blickfeld. Dazu gehören u.a. effizientere Kühlung und Heizung von Gebäuden, kürzere Wege und effizienter einsetzbare öffentliche Verkehrsmittel, leichterer Zugang zu Ausbildung und damit beschleunigte soziale Transformation.

Klimarelevante Transformation geht oft direkt mit gesundheitsrelevanten Verbesserungen und Erhöhung der Lebensqualität einher (hohes Vertrauen, vgl. Band 3, Kapitel 4; Band 3, Kapitel 6). Für den Wechsel vom Auto zum Fahrrad beispielsweise wurden eine positiv-präventive Wirkung auf das Herz-Kreislaufsystem und weitere signifikant positive Gesundheitseffekte nachgewiesen, welche die Lebenszeit statistisch signifikant ansteigen lassen, neben den positiven Umweltwirkungen für die Gesamtgesellschaft. Zusätzliche gesundheitsfördernde Wirkungen wurden ebenso für nachhaltige Ernährung (z. B. wenig Fleisch) nachgewiesen.

Der Klimawandel wird den Migrations-Druck erhöhen, auch auf Österreich. Migration hat vielfältige Gründe. Im

globalen Süden wird sich der Klimawandel besonders stark auswirken und erhöhte Migration, vor allem innerhalb des globalen Südens erzeugen. Bis zum Jahr 2020 rechnet das IPCC allein in Afrika und Asien mit 74–250 Mio. betroffenen Menschen. Durch die besondere Betroffenheit des Afrikanischen Kontinents werden sich Flüchtlingsströme aus Afrika nach Europa voraussichtlich verstärken (vgl. Band 3, Kapitel 4).

Der Klimawandel ist nur eine von vielen globalen Herausforderungen, aber eine ganz zentrale (sehr hohes Vertrauen, vgl. Band 2, Kapitel 6; Band 3, Kapitel 1; Band 3, Kapitel 5). Eine nachhaltige Zukunft setzt sich beispielsweise auch mit Fragen der Bekämpfung von Armut, der Gesundheit, der gesellschaftlichen Humanressourcen, der Verfügbarkeit von Wasser und Nahrung, der intakten Böden, der Luftqualität, des Verlustes von Biodiversität sowie der Versauerung und Überfischung der Ozeane auseinander (sehr hohes Vertrauen, vgl. Band 3, Kapitel 6). Diese Fragestellungen sind nicht voneinander unabhängig: der Klimawandel wirkt häufig verschärfend auf die anderen Probleme. So trifft er die schwächsten Bevölkerungsgruppen oft am härtesten. Die Staatengemeinschaft hat einen UN-Prozess zur Formulierung der Ziele nachhaltiger Entwicklung nach 2015 angestoßen (Sustainable Development Goals). Der Klimawandel steht im Zentrum dieser Ziele und zahlreicher weltweiter Spannungsfelder. Klimaschutzmaßnahmen können somit zahlreiche Zusatznutzen zur Erreichung weiterer globaler Zielsetzungen generieren (hohes Vertrauen, vgl. Band 3, Kapitel 6).

Auswirkungen auf Bereiche und Sektoren sowie Maßnahmen der Minderung und Anpassung

Boden und Landwirtschaft

Der Klimawandel führt zu Humusverlust und THG-Emissionen aus dem Boden. Temperaturanstieg, Temperaturextreme und Trockenphasen, stärker ausgeprägte Gefrier- und Auftauprozesse im Winter sowie starkes und langes Austrocknen des Bodens gefolgt von Starkniederschlägen verstärken bestimmte Prozesse im Boden. Dies kann zu einer Beeinträchtigung von Bodenfunktionen, wie Bodenfruchtbarkeit, Wasser- und Nährstoffspeicherkapazität, Humusabbau, Bodenerosion u.a. führen. Erhöhte THG-Emissionen aus dem Boden sind die Folge (sehr wahrscheinlich, vgl. Band 2, Kapitel 5).

Menschliche Eingriffe vergrößern den Flächenanteil von Böden mit geringerer Widerstandsfähigkeit gegenüber dem Klimawandel. Bodenversiegelung sowie Folgen unangepasster Bodennutzung und -bearbeitung wie etwa Verdichtung, Erosion und Humusverlust schränken die Bodenfunktionen weiter ein und verringern die Fähigkeit des Bodens, Auswirkungen des Klimawandels abzupuffern (sehr wahrscheinlich, vgl. Band 2, Kapitel 5).

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft sind regional unterschiedlich. In kühleren, niederschlagsreicheren Gebieten – beispielsweise im nördlichen Alpenvorland – steigert wärmeres Klima überwiegend das durchschnittliche Ertragspotenzial von Nutzpflanzen. In niederschlagsärmeren Gebieten nördlich der Donau sowie im Osten und Südosten Österreichs werden zunehmende Trockenheit und Hitze das durchschnittliche Ertragspotenzial, vor allem unbewässerter Sommerkulturen, langfristig verringern und die Ausfallsrisiken erhöhen. Das klimatische Anbaupotenzial wärmeliebender Nutzpflanzen, wie z. B. Körnermais oder Weintrauben, weitet sich deutlich aus (sehr wahrscheinlich, vgl. Band 2, Kapitel 3).

Wärmeliebende Schädlinge breiten sich in Österreich aus. Das Schadpotenzial in der Landwirtschaft durch – zum Teil neu auftretende – wärmeliebende Insekten nimmt zu. Durch den Klimawandel verändert sich auch das Auftreten von Krankheiten und Unkräutern (sehr wahrscheinlich, vgl. Band 2, Kapitel 3).

Auch Nutztiere leiden unter dem Klimawandel. Zunehmende Hitzeperioden können bei Nutztieren die Leistung verringern und das Krankheitsrisiko erhöhen (sehr wahrscheinlich, vgl. Band 2, Kapitel 3).

Anpassungsmaßnahmen in der Landwirtschaft können unterschiedlich rasch umgesetzt werden. Innerhalb weniger Jahre umsetzbar sind unter anderem verbesserter Verdunstungsschutz im Ackerbau (z. B. effiziente Mulchdecken, reduzierte Bodenbearbeitung, Windschutz), effizientere Bewässerungsmethoden, Anbau trocken- oder hitzeresistenter Arten bzw. Sorten, Hitzeschutz in der Tierhaltung, Veränderung der Anbau- und Bearbeitungszeitpunkte sowie der Fruchtfolge, Frost-, Hagelschutz und Risikoabsicherung (sehr wahrscheinlich, vgl. Band 3, Kapitel 2).

Mittelfristig umsetzbare Anpassungsmaßnahmen umfassen unter anderem Boden- und Erosionsschutz, Humusaufbau, bodenschonende Bewirtschaftungsformen, Wasserrückhaltestrategien, Verbesserung von Bewässerungsinfrastruktur und -technik, Warn-, Monitoring- und Vorhersagesysteme für wetterbedingte Risiken, Züchtung stressresistenter Sorten, Risikoverteilung durch Diversifizierung, Steigerung der Lagerkapazitäten sowie Tierzucht und Anpassungen im Stallbau und in der Haltungstechnik (sehr wahrscheinlich, vgl. Band 3, Kapitel 2).

Die durch den Klimawandel bedingte Veränderung der klimatischen Anbaueignung wärmeliebender Nutzpflanzen

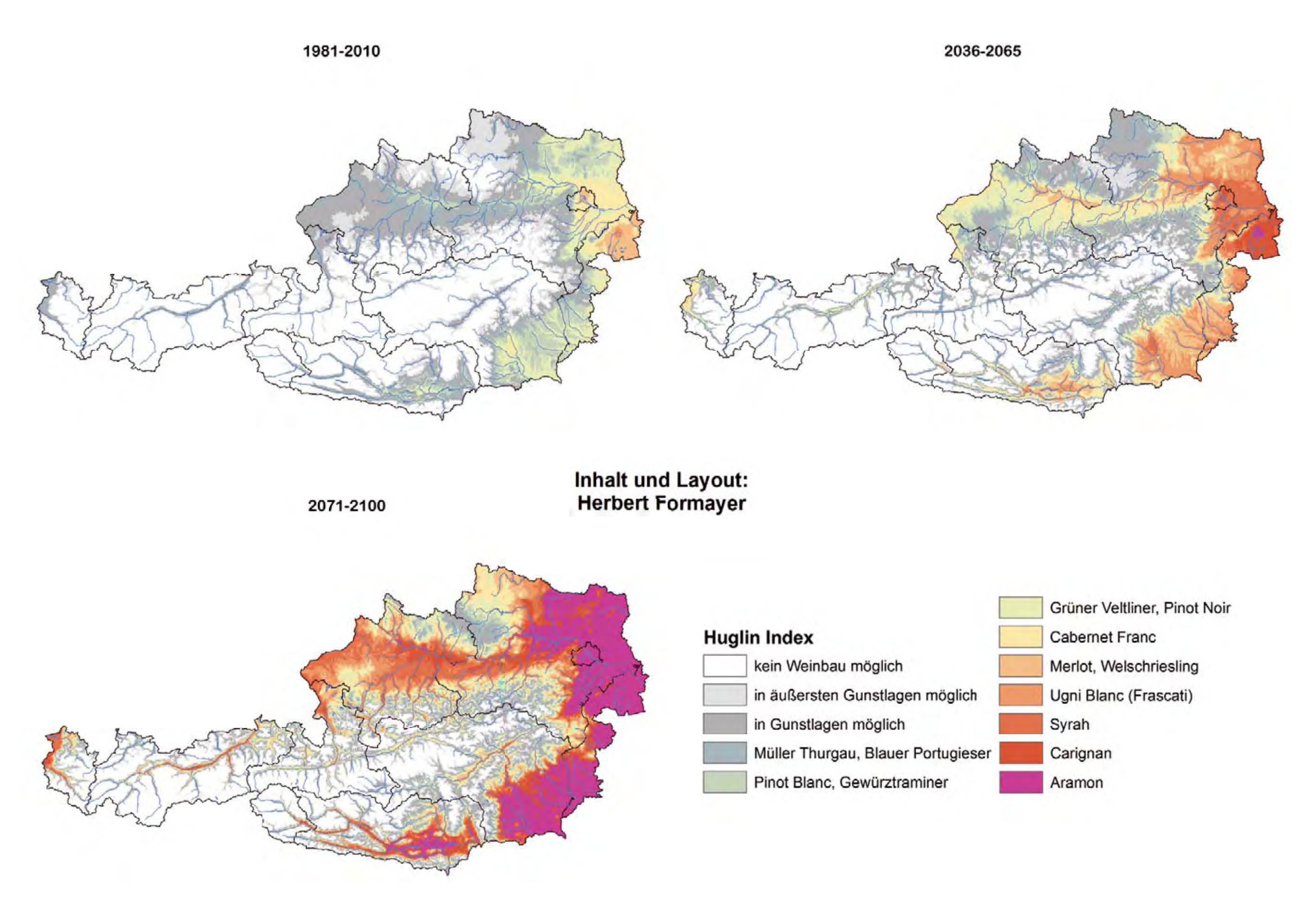


Abbildung 4 Entwicklung der klimatischen Anbaueignung verschiedener Weinsorten unter Berücksichtigung der optimalen Wärmesummen und der Niederschläge in Österreich im vergangenen Klima (beobachtet, oben) und einem Klimaszenario für Mitte und Ende des 21. Jahrhunderts (modelliert). Die Farbtöne von blau über gelb bis violett bedeuten zunehmende Wärmesummen mit ausschließlich darauf beruhenden Sortenzuordnungen. Man sieht deutlich die zunehmende Eignung für Rotweine, gegen Ende des Jahrhunderts schon extrem hitzeliebende Sorten (vgl. Band 2, Kapitel 3). Quelle: Eitzinger und Formayer (2012)

ist in Abbildung 4 am Beispiel Wein dargestellt. Viele andere wärmeliebende Nutzpflanzen wie Körnermais, Sonnenblumen oder Sojabohnen zeigen ähnliche Ausweitungen der klimatischen Anbaueignung. (vgl. Band 2, Kapitel 3)

Die Landwirtschaft kann in vielfältiger Weise THG-Emissionen verringern und Kohlenstoffsenken verstärken. Bei gleichbleibender Produktionsmenge liegen die größten Reduktionspotenziale in den Bereichen Wiederkäuerfütterung, Düngungspraktiken, Reduktion der Stickstoffverluste und Erhöhung der Stickstoffeffizienz (sehr wahrscheinlich, vgl. Band 3, Kapitel 2). Nachhaltige Strategien zur THG-Reduktion in der Landwirtschaft erfordern ressourcenschonende und -effiziente Bewirtschaftungskonzepte unter Einbeziehung von ökologischem Landbau, Präzisionslandwirtschaft und Pflanzenzucht unter Erhaltung der genetischen Vielfalt (wahrscheinlich, vgl. Band 3, Kapitel 2).

Forstwirtschaft

Wärmeres und trockeneres Klima wird die Biomasseproduktivität der österreichischen Wälder stark beeinflussen. Die Produktivität nimmt in Berglagen und in Regionen mit ausreichendem Niederschlag aufgrund der Klimaerwärmung zu. In östlichen und nordöstlichen Tieflagen und in inneralpinen Beckenlagen nimmt sie hingegen aufgrund zunehmender Trockenperioden ab. (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage, vgl. Band 2, Kapitel 3; Band 3, Kapitel 2)

Die Störungen in Waldökosystemen nehmen unter allen diskutierten Klimaszenarien an Intensität und Häufigkeit zu. Insbesondere gilt dies für das Auftreten wärmeliebender Insekten wie z. B. Borkenkäfern. Zusätzlich ist mit neuartigen Schäden durch importierte oder aus südlicheren Regionen einwandernde Schadorganismen zu rechnen. Abiotische Störungsfaktoren wie etwa Stürme, Spät- und Frühfröste und Nassschnee-Ereignisse oder Waldbrände könnten ebenfalls

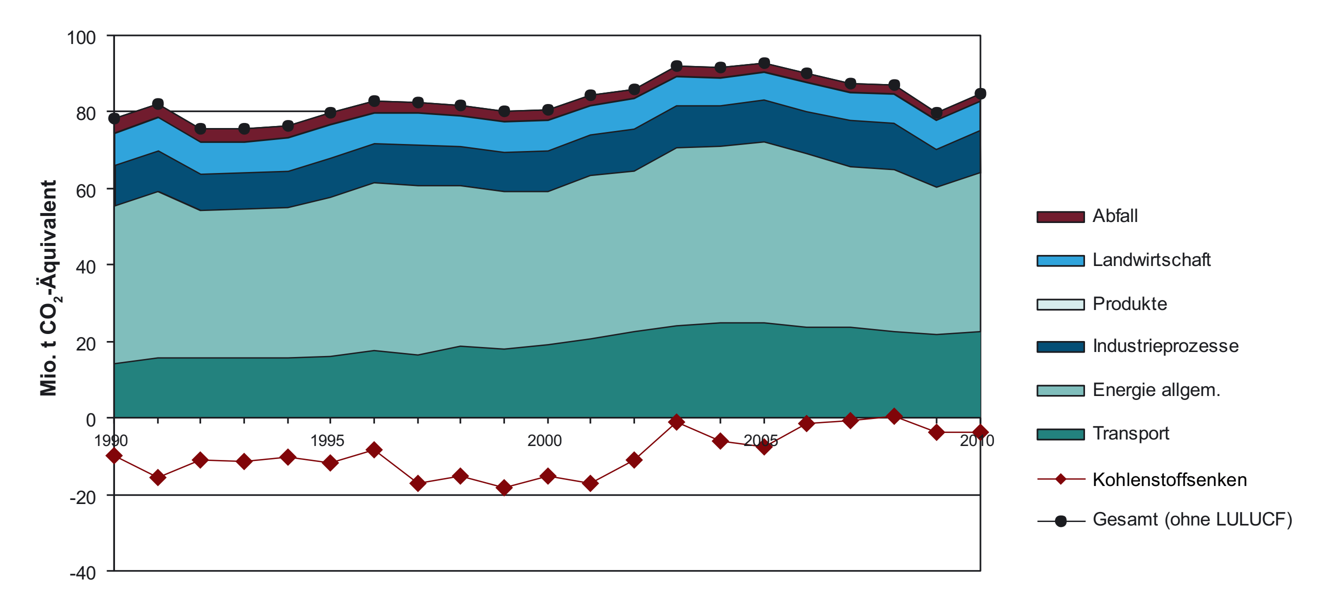


Abbildung 5 Offiziell berichtete THG-Emissionen Österreichs (nach IPCC Quellsektoren mit gesondert ausgewiesen Emissionen des Transports). Die weitgehend unter der Nulllinie liegende Kurve gibt die „Kohlenstoffsenken" wieder. In den letzten Jahren war diese Senke deutlich geringer bzw. in manchen Jahren gar nicht mehr vorhanden. Dies war vor allem eine Folge höherer Holzeinschläge; auch Veränderungen in der Erfassungsmethode trugen zu diesem Ergebnis bei. Quelle: Anderl et al. (2012)

höhere Schäden als bisher verursachen (hohe Unsicherheit). Diese Störungen können zudem Auslöser für Massenvermehrungen und Epidemien von bedeutenden forstlichen Schadorganismen wie z. B. dem Borkenkäfer sein. Störungen führen zu geringeren Erlösen in der Holzproduktion. Auch die Schutzfunktion der Wälder vor beispielsweise Steinschlag, Muren und Lawinen sowie die Kohlenstoffspeicherung leiden (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage, vgl. Band 2, Kapitel 3; Band 3, Kapitel 2).

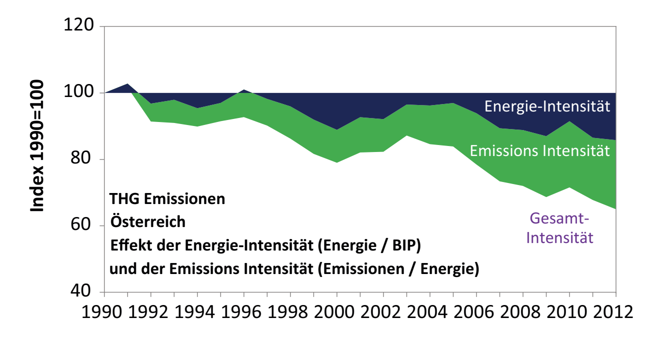
Der österreichische Wald war jahrzehntelang eine bedeutende Nettosenke für CO_2. Seit etwa 2003 ging infolge einer höheren Holzernte, Störungen und anderer Faktoren die Netto-CO_2-Aufnahme des Waldes zurück und kam in manchen Jahren ganz zum Erliegen. Eine umfassende THG-Bilanz unterschiedlicher Varianten von Waldbewirtschaftung und Verwendung von Forstprodukten berücksichtigt, neben den THG-Effekten eines verstärkten Holzeinschlages auch die Kohlenstoffspeicherung in langlebigen Holzprodukten sowie die THG-Effekte einer Einsparung anderer emissionsintensiver Produkte, die durch Holz ersetzt werden können (z. B. Fossilenergie, Stahl, Beton). Eine abschließende Beurteilung dieser systemischen Effekte würde genauere und umfassendere Analysen erfordern als sie derzeit vorliegen (vgl. Band 3, Kapitel 2).

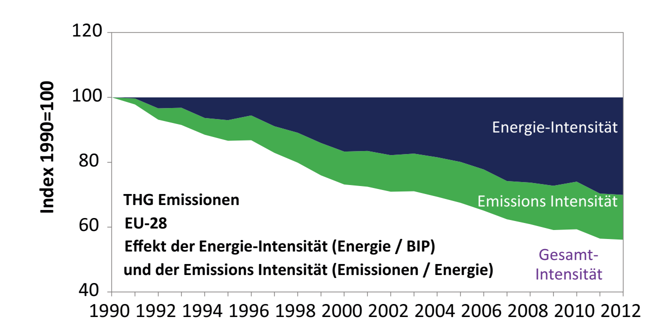
Die Widerstandskraft von Wäldern gegenüber Risikofaktoren sowie die Anpassungsfähigkeit können erhöht werden. Beispiele für Anpassungsmaßnahmen sind kleinflächigere Bewirtschaftungsformen, standorttaugliche Mischbestände und die Sicherstellung der natürlichen Waldverjüngung im Schutzwald durch angepasstes Wildmanagement. Problematisch sind vor allem Fichtenbestände auf Laubmischwaldstandorten in Tieflagen sowie Fichtenreinbestände in den Bergwäldern mit Schutzfunktion. Die Anpassungsmaßnahmen in der Forstwirtschaft sind mit beträchtlichen Vorlaufzeiten verbunden (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage, vgl. Band 3, Kapitel 2).

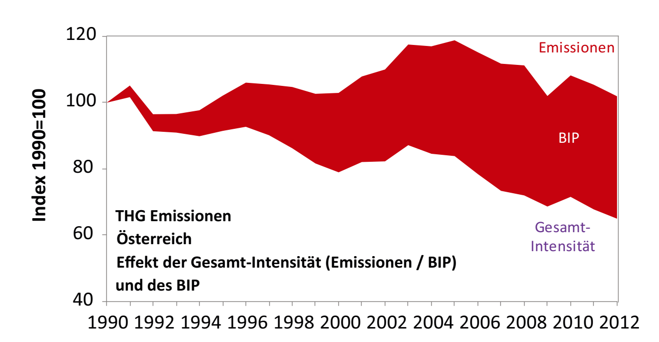
Biodiversität

Besonders vom Klimawandel betroffen sind Ökosysteme mit langer Entwicklungsdauer sowie Lebensräume der Alpen oberhalb der Waldgrenze (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage, vgl. Band 2, Kapitel 3). Moore und altholzreiche Wälder können sich nur langsam an den Klimawandel anpassen und sind deswegen besonders gefährdet. Über die Wechselwirkungen mit anderen Faktoren des Globalen Wandels, wie Landnutzungsänderungen oder die Einbringung invasiver Arten, ist wenig bekannt. Auch die Anpassungskapazitäten der Arten und Lebensräume sind nicht ausreichend erforscht (Band 2, Kapitel 3).

In alpinen Lagen können kälteangepasste Pflanzen in größere Höhen vordringen und dort einen Zuwachs der Artenvielfalt bewirken. In inselartigen Mikro-Nischen können kälteangepasste Arten trotz der Erwärmung überdauern (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage). Zuneh-







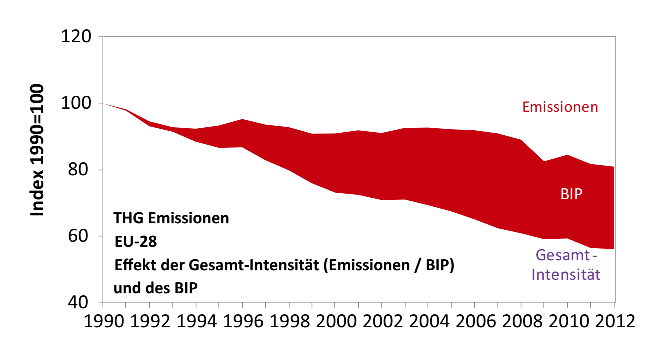


Abbildung 6 Entwicklung der THG-Intensität des BIPs sowie die darin enthaltene Entwicklung der Energieintensität (Energieverbrauch pro Euro BIP) und Emissionsintensität der Energie (THG-Emissionen pro PJ Energie) im Zeitverlauf für Österreich und die EU-28 (oberes Panel). Aus der Entwicklung der THG-Intensität in Verbindung mit jener des fast ausnahmslos steigenden BIP (unteres Panel) ergeben sich für Österreich insgesamt in diesem Zeitraum steigende THG-Emissionen (+5 %), für die EU-28 fallende (–18 %). Quelle: Schleicher (2014)

mende Fragmentierung von Populationen kann allerdings zu lokalem Aussterben führen. Aus dem Hochgebirge stammende Arten, die sich an niedrigeren Randlagen der Alpen angepasst haben, sind davon besonders betroffen (mittlere Übereinstimmung, moderate Beweislage, vgl. Band 2, Kapitel 3).

Auch Tierarten sind stark betroffen. In der Tierwelt sind Änderungen im Jahresablauf, wie die Verlängerung von Aktivitätsperioden, erhöhte Generationenfolge oder Vorverlegung der Ankunft von Zugvögeln sowie Arealverschiebungen nach Norden bzw. in höhere Lagen für einzelne Arten bereits dokumentiert. Der Klimawandel wird manche Tierarten, vor allem Generalisten, weiter begünstigen und andere, vor allem Spezialisten, gefährden (moderate Beweislage, vgl. Band 2, Kapitel 3). Die Erwärmung der Fließgewässer führt zu einer theoretischen Verschiebung der Fischhabitate um bis zu 30 km flussaufwärts. Für Bachforelle und Äsche werden z. B. geeignete Lebensräume geringer (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage, vgl. Band 2, Kapitel 3).

Energie

Österreich hat großen Nachholbedarf in der Verbesserung der Energieintensität. Anders als der EU-Durchschnitt weist Österreich in den letzten beiden Dekaden kaum Fortschritte hinsichtlich der Energieintensität auf (Energieverbrauch pro Euro BIP, siehe Abbildung 6). Seit 1990 sank vergleichsweise die Energieintensität der EU-28 hingegen um 29 % (in den Niederlanden um 23 %, in Deutschland um 30 % und in Großbritannien um 39 %). In Deutschland und Großbritannien dürfte jedoch ein Teil dieser Verbesserungen auf der Verlagerung energieintensiver Produktion ins Ausland beruhen. In der Emissionsintensität (THG-Emissionen pro PJ Energie), deren Verbesserung in Österreich den starken Ausbau der Erneuerbaren seit 1990 reflektiert, zählt Österreich hingegen gemeinsam mit den Niederlanden zu den Ländern mit der stärksten Verbesserung. Diese beiden Indikatoren gemeinsam bestimmen die THG-Emissionsintensität des Bruttoinlandsproduktes (BIP), die sowohl in Österreich als auch in den EU-28 seit 1990 abgenommen hat. Die THG-Emissionen sind langsamer gestiegen als das BIP. Im Vergleich mit den EU-28 zeigt sich dabei somit deutlich, dass Österreich bei der Senkung der Energieintensität großen Nachholbedarf hat (vgl. Band 3, Kapitel 1).

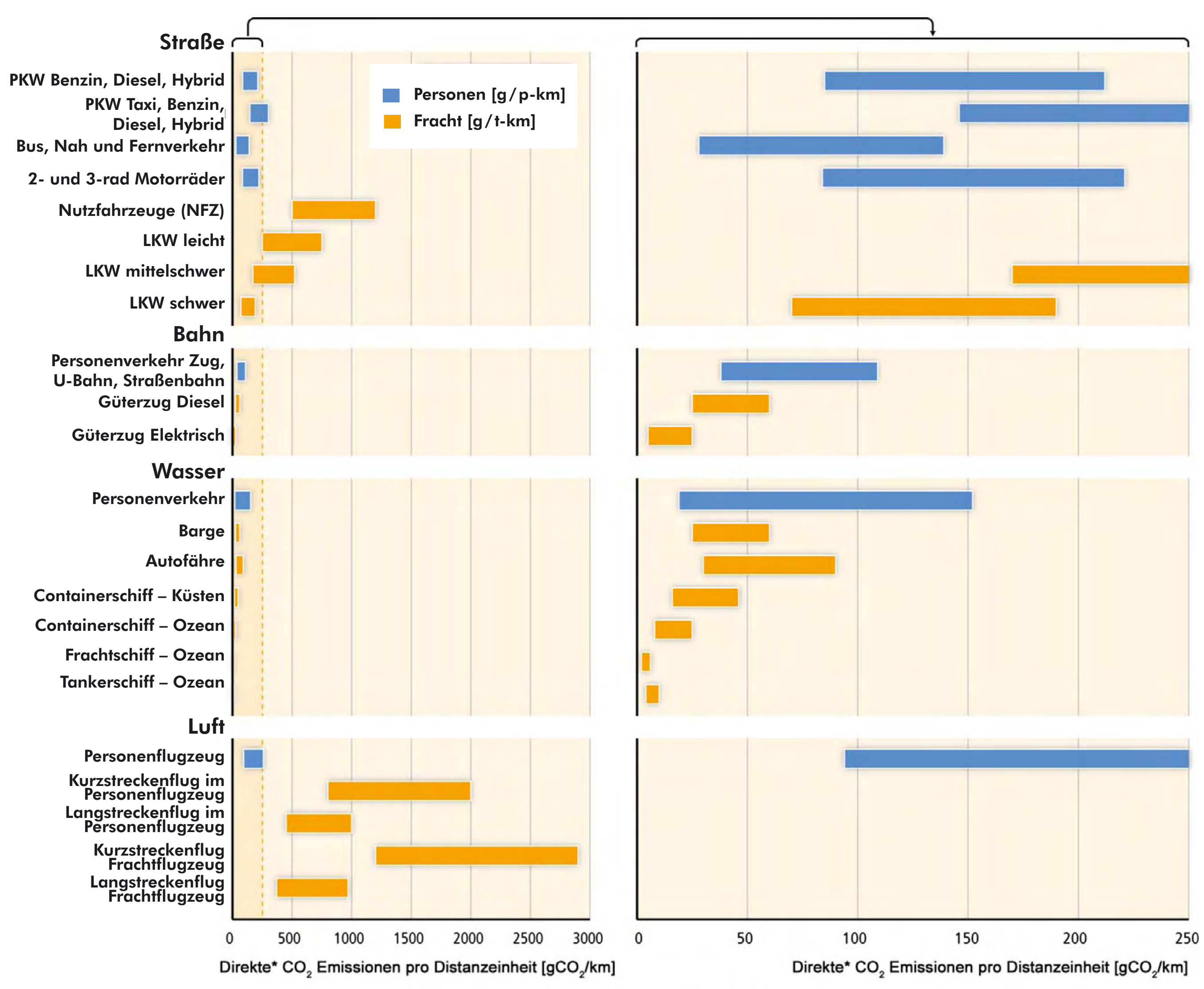


Abbildung 7 Typische direkte CO2-Emissionen pro Passagierkilometer und pro Tonnenkilometer für Fracht und für die Hauptverkehrsträger, wenn fossile Brennstoffe benutzt werden, und thermische Stromerzeugung für die Eisenbahnverkehr benutzt wird. Quelle: IPCC (2014)

Die Potenziale erneuerbarer Energien in Österreich werden derzeit nicht ausgeschöpft. Der Anteil erneuerbarer Energieträger am Bruttoendenergieverbrauch ist in Österreich zwischen 2005 und 2011 von 23,8 % auf 31 % gestiegen, bisher primär durch den Ausbau biogener Brennstoffe, wie z. B. Pellets und Biotreibstoffe. Zukünftig können Wind und Photovoltaik einen erheblichen Beitrag leisten. Die Zielvorgabe für 2020 von 34 % der Endenergie aus Erneuerbaren kann bei derzeitigen Steigerungsraten leicht erreicht werden. Für die mittelfristig erforderliche Umstellung auf ein THG-neutrales Energiesystem bis 2050 ist jedoch eine Abdeckung der gesamten Energienachfrage mit erneuerbaren Energieträgern notwendig. Wenn Problemverlagerungen vermieden werden sollen, ist es wichtig, vor einem allfälligen weiteren Ausbau der Wasserkraft und der verstärkten Nutzung von Biomasse in Hinkunft eine gesamthafte Betrachtung der THG-Bilanzen anzustellen sowie indirekte und systemische Effekte zu berücksichtigen. Andere Umweltziele verlieren im Bemühen um Kli-

maschutz nicht ihre Bedeutung. (vgl. Band 3, Kapitel 3 und Band 3, Kapitel 6)

Verkehr und Industrie

Von allen Sektoren sind in den letzten beiden Dekaden die THG-Emissionen im Verkehr mit +55 % am stärksten gestiegen (sehr hohes Vertrauen, vgl. Band 3, Kapitel 3)**.** Effizienzsteigerungen bei den Fahrzeugen wurden durch schwerere und leistungsstärkere Fahrzeuge sowie höhere Fahrleistungen weitgehend kompensiert. Die Begrenzung des CO_2-Ausstoßes pro gefahrenem Kilometer für PKW und Lieferwagen zeigt jedoch erste Erfolge (vgl. Band 3, Kapitel 3). Angebotsänderungen im öffentlichen Verkehr und (spürbare) Preissignale haben nachweisliche Auswirkungen auf den Anteil des Individualverkehrs in Österreich.

Um eine deutliche Reduktion der THG-Emissionen des Personenverkehrs zu erzielen, ist ein umfassendes Maßnahmenpaket notwendig. Zentral sind dabei eine deutliche Reduktion des Einsatzes fossiler Energie, die Erhöhung der Energieeffizienz sowie eine Veränderung des NutzerInnenverhaltens. Eine Voraussetzung hierfür sind verbesserte Wirtschafts- und Siedlungsstrukturen, in denen die Wegstrecken minimiert sind. Dies kann zur Stärkung umweltfreundlicher Mobilitätsformen, wie Zufußgehen und Radfahren, genutzt werden. Öffentliche Verkehrsmittel wären auszubauen und zu verbessern, bei gleichzeitiger Minimierung ihrer CO_2-Emissionen. Technische Maßnahmen für den PKW-Verkehr beinhalten weitere, massive Effizienzsteigerungen bei den Fahrzeugen oder den Einsatz alternativer Antriebe (vgl. Band 3, Kapitel 3) – vorausgesetzt, die dafür notwendige Energie wird ebenfalls emissionsarm produziert.

Der Güterverkehr, gemessen in Tonnenkilometern, nahm in Österreich in den letzten Dekaden stärker zu als das BIP. Die weitere Entwicklung der Transportnachfrage ist durch einer Reihe wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Rahmenbedingungen gestaltbar. Durch Optimierung der Logistik und Stärkung CO_2-effizienterer Verkehrsmittel können zudem Emissionen reduziert werden. Eine Reduktion der THG-Emissionen pro Tonnenkilometer kann durch alternative Antriebe und Treibstoffe, Effizienzsteigerungen sowie Verlagerung auf den Schienenverkehr erreicht werden (vgl. Band 3, Kapitel 3).

Die Industrie ist größter THG-Emittent in Österreich. Im Jahre 2010 betrug der Anteil des produzierenden Bereiches am gesamten österreichischen Energieendverbrauch sowie an den THG-Emissionen jeweils knapp 30 %. Emissionsreduktionen in einem Ausmaß von etwa 50 % und mehr können nicht sektorintern durch kontinuierliche nur graduelle Verbesserungen und Anwendung des jeweiligen Standes der Technik erreicht werden. Hier ist entweder die Entwicklung klimaschonender neuer Verfahren notwendig (radikal neue Technologien und Produkte bei drastischer Reduktion des Endenergieeinsatzes) oder allenfalls die Anwendung von Verfahren zur Speicherung der THG-Emissionen (Carbon Capture and Storage, wie etwa in den EU-Szenarien zum Energiefahrplan 2050 hinterlegt; sehr wahrscheinlich). (vgl. Band 3, Kapitel 5)

Tourismus

Der Wintertourismus wird durch den stetigen Temperaturanstieg weiter unter Druck kommen. Im Vergleich mit naturschneesichereren Destinationen drohen vielen österreichischen Schigebieten Nachteile durch steigende Beschneiungskosten (sehr wahrscheinlich, vgl. Band 3, Kapitel 4).

Zukünftige Anpassungsmöglichkeiten durch technische Beschneiung sind begrenzt. Es sind zwar derzeit 67 % der Pistenfläche mit Beschneiungsanlagen ausgerüstet, jedoch ist der Einsatz der Anlagen durch steigende Temperaturen und die Verfügbarkeit von Wasser eingeschränkt (wahrscheinlich, vgl. Band 3, Kapitel 4). Die Förderung des Ausbaus der Beschneiung durch die öffentliche Hand könnte daher zu Fehlanpassungen und kontraproduktiven Lock-in Effekten führen.

Durch zukünftig zu erwartende sehr hohe Temperaturen im Mittelmeerraum im Sommer (sehr wahrscheinlich) könnte der Tourismus in Österreich profitieren. Allerdings kann auch bei gleich guter Auslastung im Sommer die Wertschöpfung des Winters nicht erzielt werden (vgl. Band 3, Kapitel 4).

Einbußen im Tourismus im ländlichen Raum haben hohe regionalwirtschaftliche Folgekosten, da der Verlust an Arbeitsplätzen oft nicht durch andere Branchen aufgefangen werden kann. Dies kann im peripheren ländlichen Raum, der aufgrund des demographischen Wandels und der zunehmenden Urbanisierungswelle bereits jetzt vor großen Herausforderungen steht, zu weiterer Absiedlung führen (vgl. Band 3, Kapitel 1; Band 3, Kapitel 4).

Beim Städtetourismus sind im Hochsommer Rückgänge auf Grund von Hitzetagen und tropischen Nächten möglich (sehr wahrscheinlich)**.** Verlagerungen der Touristenströme in andere Saisonen und Regionen sind möglich und derzeit schon beobachtbar (vgl. Band 3, Kapitel 4).

Erfolgreiche PionierInnen im nachhaltigen Tourismus zeigen Wege der THG-Emissionsreduktion in dieser Branche auf. In Österreich gibt es Vorzeigeprojekte auf allen Ebenen – von Einzelobjekten, bis hin zu Gemeinden und Regionen – sowie in verschiedenen Bereichen, wie Hotellerie,

Mobilität oder touristisches Angebot. Aufgrund der langfristigen Infrastrukturinvestitionen ist der Tourismus für Lock-in-Effekte besonders anfällig. (vgl. Band 3, Kapitel 4)

Infrastruktur

Energiebedarf und THG-Emissionen für Gebäudeheizung und -kühlung können durch gezielten Einsatz bereits verfügbarer Technologien wesentlich reduziert werden (hohe Übereinstimmung, vgl. Band 3, Kapitel 5). Ein Teil dieses Potenzials ist kostengünstig realisierbar. Um den Energiebedarf des Gebäudebestandes weiter zu vermindern, ist hochwertige thermische Sanierung des Gebäudebestands notwendig. Zur Energieversorgung sind zur Reduktion der THG-Emissionen überwiegend alternative Energieträger, beispielweise Solarthermie oder Photovoltaik zu verwenden. Wärmepumpen können nur im Rahmen eines integrierten Konzepts, welches CO_2-arme Stromerzeugung sicherstellt, einen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Biomasse wird ebenfalls mittelfristig von Bedeutung sein. Fernwärme und -kälte werden langfristig aufgrund des geringeren Bedarfs an Bedeutung verlieren.

Einen wesentlichen Beitrag zur zukünftigen THG-Neutralität in Gebäuden können auch Baunormen leisten, die (nahezu-) Null- und Plus-Energiehäuser fördern. Diese sind EU-weit erst ab 2020 vorgesehen. Angesichts der zahlreichen innovativen Pilotprojekte könnte Österreich in diesem Bereich eine Vorreiterrolle übernehmen. Durch zielgerichtete Baunormen und Sanierungsmaßnahmen könnten auch künftige Kühllasten wesentlich reduziert werden. Spezifische Raumplanungs- und Bebauungsbestimmungen können – auch außerhalb der städtischen Siedlungsräume – verdichtete Bauformen mit höherer Energieeffizienz in größerem Ausmaß gewährleisten. (vgl. Band 3, Kapitel 5)

Vorausschauende Planung von Infrastruktur mit langer Nutzungsdauer kann Fehlinvestitionen vermeiden. Vor dem Hintergrund sich kontinuierlich in Richtung postfossiler Energieversorgung ändernder Rahmenbedingungen gilt es Infrastrukturprojekte für städtische Räume, für Verkehr und Energieversorgung auf ihre emissionsreduzierende Wirkung und auf ihre Resilienz gegenüber Klimaänderungen zu überprüfen. Raumstrukturen können derart gestaltet werden, dass Verkehrs- und Energieinfrastrukturen abgestimmt und effizient mit geringem Ressourcenverbrauch errichtet und genutzt werden. (vgl. Band 3, Kapitel 5)

Dezentrale Energieversorgung mit erneuerbarer Energie erfordert neue Infrastruktur. Neben neuen Möglichkeiten von Erneuerbaren in Stand-alone Lösungen (z. B. off-grid Photovoltaik) gibt es auch neue Optionen zur Netz-Einbindung. Lokale Versorgungsnetze für vor Ort erzeugtes Biogas sowie Netze zur Nutzung lokaler, meist industrieller, Abwärme erfordern angepasste Strukturen und Steuerung (vgl. Band 3, Kapitel 1; Band 3, Kapitel 3). „Smart Grids" und „Smart Meters" ermöglichen bei lokal erzeugtem, in Netze eingespeistem Strom, z. B. aus Co- und Polygeneration oder privaten Photovoltaik-Anlagen, effizientere Energienutzung und werden deswegen als Bestandteile eines künftigen Energiesystems diskutiert (vgl. Band 3, Kapitel 5). Jedoch gibt es Bedenken bezüglich der Gewährleistung der Netzsicherheit und des Daten- und Persönlichkeitsschutzes; diese sind noch nicht ausreichend geklärt beziehungsweise rechtlich geregelt.

Extremereignisse können Energie- und Verkehrsinfrastrukturen vermehrt beeinträchtigen. Problematisch sind längere und intensivere Hitzeperioden (sehr wahrscheinlich), möglicherweise intensivere Niederschläge und daraus resultierende Hangrutschungen und Überschwemmungen (wahrscheinlich), Sturm (möglich) und erhöhte Nass-Schneelasten (möglich). (vgl. Band 1, Kapitel 3; Band 1, Kapitel 4; Band 1, Kapitel 5; Band 2, Kapitel 4). Sie stellen Gefahrenpotentiale für Siedlungs-, Verkehrs-, Energie- und Kommunikationsinfrastrukturen dar. Soll ein Anstieg von Klimaschäden und -kosten vermieden werden, ist der Aus- und Neubau von Siedlungen und Infrastruktureinrichtungen in derzeit bereits von Naturgefahren betroffenen Bereichen zu vermeiden. Darüber hinaus ist bei der Ausweisung von Gefahrenzonen auf die zukünftige Entwicklung im Zuge des Klimawandels vorsorglich Bedacht zu nehmen. Bestehenden Einrichtungen können durch Anpassungsmaßnahmen, wie etwa die Schaffung vermehrter Retentionsflächen gegen Hochwasser, erhöhten Schutz erhalten.

Die vielfältigen Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft erfordern umfangreiche und integrative Anpassungsmaßnahmen. Sowohl Hoch- als auch Niederwasser in österreichischen Fließgewässern kann in vielen Bereichen, von der Schifffahrt über die Bereitstellung von Industrie- und Kühlwasser bis hin zur Trinkwasserversorgung, zu Problemen führen. In der Trinkwasserversorgung kann die Vernetzung kleinerer Versorgungseinheiten sowie die Schaffung von Redundanzen bei den Rohwasserquellen zur Anpassung beitragen (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage, vgl. Band 3, Kapitel 2).

Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel können auch in anderen Bereichen positive Wirkungen entfalten. Durch den Schutz und die Ausweitung von Retentionsflächen, wie Auen, können Ziele des Hochwasser- und Biodiversitätsschutzes kombiniert werden (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage). Die Erhöhung des Anteils organischer Substanz

im Boden führt zu einer Steigerung der Speicherkapazität von Bodenwasser (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage, vgl. Band 2, Kapitel 6) und trägt somit sowohl zum Hochwasserschutz als auch zur Kohlenstoffbindung und damit zum Klimaschutz bei (vgl. Band 3, Kapitel 2).

Gesundheit und Gesellschaft

Der Klimawandel kann direkt oder indirekt Probleme für die menschliche Gesundheit verursachen. Hitzewellen können insbesondere bei älteren Personen, aber auch bei Kleinkindern oder chronisch Kranken zu Herz-Kreislaufproblemen führen. Es gibt eine ortsabhängige Temperatur, bei welcher die Sterblichkeitsrate am geringsten ist; jenseits dieser nimmt die Mortalität pro 1 °C Temperaturanstieg um 1–6 % zu (sehr wahrscheinlich, hohes Vertrauen, vgl. Band 2, Kapitel 6; Band 3, Kapitel 4). Vor allem ältere Menschen und auch Kleinkinder weisen oberhalb dieser optimalen Temperatur einen deutlichen Anstieg des Sterberisikos auf. Verletzungen und Krankheiten, die in Zusammenhang mit Extremereignissen (z. B. Überschwemmungen und Muren) stehen und Allergien, ausgelöst durch bisher in Österreich nicht heimische Pflanzen, wie etwa die Ambrosie, zählen ebenfalls zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Gesundheit.

Eine große Herausforderung für das Gesundheitssystem sind die indirekten Auswirkungen des Klimawandels auf die menschliche Gesundheit. Hier spielen vor allem jene Krankheitserreger eine Rolle, die von blutsaugenden Insekten (und Zecken) übertragen werden. Denn nicht nur die Erreger selbst, sondern auch die Vektoren (Insekten und Zecken) sind in ihrer Aktivität und Verbreitung von klimatischen Bedingungen abhängig. Neu eingeschleppte Krankheitserreger (Viren, Bakterien und Parasiten, aber auch allergene Pflanzen und Pilze, wie z. B. das beifußblättrige Traubenkraut (*Ambrosia artemisiifolia*) sowie der Eichenprozessionsspinner (*Thaumetopoea processionea*) und neue Vektoren (z. B. „Tigermücke", *Stegomyia albopicta*) können sich etablieren, bzw. bereits vorhandene Krankheitserreger können sich regional ausbreiten (oder auch verschwinden). Solche Einschleppungen sind praktisch nicht voraussagbar und die Möglichkeiten Gegenmaßnahmen zu ergreifen sind gering (möglich, mittleres Vertrauen, vgl. Band 2, Kapitel 6).

Gesundheitsrelevante Anpassung betrifft vielfach individuelle Verhaltensänderungen entweder eines Großteils der Bevölkerung oder von Angehörigen bestimmter Risikogruppen (wahrscheinlich, mittlere Übereinstimmung, vgl. Band 3, Kapitel 4). Viele Maßnahmen der Anpassung und der Minderung, die primär nicht auf eine bessere Gesundheit zielen, haben möglicherweise indirekt bedeutsame gesundheitsrelevante Nebenwirkungen, wie etwa der Umstieg vom Auto auf das Fahrrad (wahrscheinlich, mittlere Übereinstimmung, vgl. Band 3, Kapitel 4).

Der Gesundheitssektor ist Verursacher und Betroffener des Klimawandels. Im Bereich der Infrastruktur des Gesundheitssektors sind sowohl Minderungsmaßnahmen als auch Anpassungsmaßnahmen erforderlich. Wirksame Minderungsmaßnahmen können im Mobilitätsverhalten von MitarbeiterInnen und PatientInnen sowie in der Beschaffung von Ge- und Verbrauchsprodukten gesetzt werden (sehr wahrscheinlich, hohe Übereinstimmung, vgl. Band 3, Kapitel 4). Zur gezielten Anpassung an längerfristige Veränderungen fehlt es teilweise an Kenndaten aus der Medizin und der Klimaforschung, dennoch können schon jetzt Maßnahmen gesetzt werden – etwa in der Hitzevorsorge.

Sozial schwächere Gruppen sind im Allgemeinen den Folgen des Klimawandels stärker ausgesetzt. Meist ist es das Zusammentreffen verschiedener Faktoren (niedriges Einkommen, geringer Bildungsgrad, wenig Sozialkapital, prekäre Arbeits- und Wohnverhältnisse, Arbeitslosigkeit, eingeschränkte Handlungsspielräume), die weniger privilegierte Bevölkerungsgruppen eher verwundbar für Folgen des Klimawandels machen. Die unterschiedliche Betroffenheit sozialer Gruppen ergibt sich durch die unterschiedliche Anpassungsfähigkeit auf geänderte Klimaverhältnisse sowie unterschiedliche Betroffenheit durch klimapolitischen Maßnahmen, wie etwa höhere Relevanz von Steuern und Gebühren auf Energie (wahrscheinlich, hohes Vertrauen, vgl. Band 2, Kapitel 6).

Klimawandel, Anpassung und Klimaschutz führen zu vermehrter Konkurrenz um die Ressource Raum. Betroffen sind vor allem naturnahe und landwirtschaftliche Flächen: Flächen zur Gewinnung Erneuerbarer Energie, Retentionsflächen und Schutzdämme zur Minderung des Hochwasserrisikos gehen häufig zu Lasten landwirtschaftlicher Flächen. Zunehmende Bedrohung von Siedlungsgebieten durch Naturgefahren könnte mittelfristig vermehrt Umsiedlungen erforderlich machen (hohes Vertrauen, vgl. Band 2, Kapitel 2; Band 2, Kapitel 5). Um gefährdeten Arten die Anpassung an den Klimawandel durch Wanderung zu besser geeigneten Standorten zu erleichtern und zur bestmöglichen Erhaltung der Biodiversität sind Schutzgebiete erforderlich, die idealer Weise durch Korridore vernetzt sind (hohes Vertrauen, vgl. Band 3, Kapitel 2). Es gibt keine Raumstrategie für Österreich, die Leitplanken für relevante Entscheidungen liefert (vgl. Band 3, Kapitel 6).

Transformation

Obwohl in allen Sektoren bedeutendes Emissionsminderungspotential vorhanden ist, kann mit einzel-sektoralen, meist technologieorientierten Maßnahmen allein der von Österreich zu erwartende Beitrag zur Einhaltung des globalen 2 °C Zieles nicht erreicht werden. Das 2 °C Ziel einzuhalten erfordert auch in Österreich mehr als inkrementell verbesserte Produktionstechnologien, grünere Konsumgüter und eine Politik, die (marginale) Effizienzsteigerungen anstößt. Es ist eine Transformation der Interaktion zwischen Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt erforderlich, die von Verhaltensänderungen der Einzelnen getragen wird und solche ihrerseits auch befördert. Wird die Transformation nicht rasch eingeleitet und umgesetzt, steigt die Gefahr unerwünschter, irreversibler Veränderungen (vgl. Band 3, Kapitel 6).

Eine Transformation Österreichs in eine emissionsarme Gesellschaft erfordert teilweise radikale strukturelle und technische Umbaumaßnahmen, soziale und technologische Innovation und partizipative Planungsprozesse (mittlere Übereinstimmung, mittlere Beweislage, vgl. Band 3, Kapitel 6). Sie setzt Experimentierfreudigkeit und Erfahrungslernen voraus die Bereitschaft Risiken einzugehen und zu akzeptieren, dass einige Neuerungen scheitern werden. Erneuerungen von der Wurzel her, auch hinsichtlich der Güter und Dienstleistungen, die von der österreichischen Wirtschaft produziert werden und groß angelegte Investitionsprogramme werden notwendig sein. In der Beurteilung neuer Technologien und gesellschaftlicher Entwicklungen ist eine Orientierung entlang einer Vielzahl von Kriterien nötig (Multikriterienansatz) und eine integrativ sozio-ökologisch orientierte Entscheidungsfindung anstelle von kurzfristig und eng definierten Kosten-Nutzen Rechnungen. Für ein effektives Handeln sollte nationales Vorgehen international akkordiert werden, sowohl mit den umgebenden Staaten als auch mit der weltweiten Staatengemeinschaft und insbesondere in Partnerschaft mit Entwicklungsländern (vgl. Band 3, Kapitel 6).

In Österreich sind bereits Änderungen in den Wertvorstellungen vieler Menschen festzustellen, die einer sozialökologischen Transformation zuträglich sind. Einzelne PionierInnen des Wandels sind auch schon dabei diese Vorstellungen praktisch in klimafreundlichen Handlungs- und Geschäftsmodellen umzusetzen (z. B. Energiedienstleistungsgesellschaften im Immobilienbereich, klimafreundliche Mobilität, Nahversorgung) sowie Gemeinden und Regionen zu transformieren (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage). Auch auf der politischen Ebene sind Ansätze zur klimafreundlichen Transformation auszumachen. Will Österreich seinen Beitrag zur Erreichung des globalen 2 °C-Zieles leisten und auf europäischer Ebene sowie international eine künftige, klimafreundliche Entwicklung mitgestalten, müssen solche Initiativen intensiviert und durch begleitende Politikmaßnahmen, die eine verlässliche Regulierungslandschaft schaffen, gestützt werden (hohe Übereinstimmung, mittlere Beweislage, vgl. Band 3, Kapitel 6).

Politische Initiativen in Hinblick auf Klimaschutz und Klimawandelanpassung sind – zur Erreichung der zuvor genannten Ziele – auf allen Ebenen in Österreich erforderlich: Bund, Länder, und Gemeinden. Die Kompetenzen sind in der föderalen Struktur Österreichs so verteilt, dass zudem nur ein abgestimmtes Vorgehen bestmögliche Effektivität sowie die Zielerreichung selbst gewährleisten kann (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage). Für eine effektive Umsetzung der zur Zielerreichung erforderlichen substantiellen Transformation ist zudem die Aktivierung eines breiten Spektrums von Instrumenten angebracht (hohe Übereinstimmung, mittlere Beweislage).

Bildnachweis

Abbildung 1 Für AAR14 erstellt auf Basis von: IPCC, 2013: In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor,S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (Eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.; IPCC, 2000: Special Report on Emissions Scenarios [Nebojsa Nakicenovic and Rob Swart (Eds.)]. Cambridge University Press, UK.; GEA, 2012: Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.

Abbildung 2 Für AAR14 erstellt auf Basis von: Auer, I., Böhm, R., Jurkovic, A., Lipa, W., Orlik, A., Potzmann, R., Schöner, W., Ungersböck, M., Matulla, C., Briffa, K., Jones, P., Efthymiadis, D., Brunetti, M., Nanni, T., Maugeri, M., Mercalli, L., Mestre, O., Moisselin, J.-M., Begert, M., Müller-Westermeier, G., Kveton, V., Bochnicek, O., Stastny, P., Lapin, M., Szalai, S., Szentimrey, T., Cegnar, T., Dolinar, M., Gajic-Capka, M., Zaninovic, K., Majstorovic, Z., Nieplova, E., 2007. HISTALP – historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region. International Journal of Climatology 27, 17–46. doi:10.1002/joc.1377; ENSEMBLES project: Funded by the European Commission's 6th Framework Programme through contract GOCE-CT-2003-505539; reclip:century: Funded by the Austrian Climate Research Program (ACRP), Project number A760437

Abbildung 3 Muñoz, P., Steininger, K.W., 2010: Austria's CO_2 responsibility and the carbon content of its international trade. Ecological Economics 69, 2003–2019. doi: 10.1016/j.ecolecon.2010.05.017

Abbildung 4 Für AAR14 erstellt. Datenquelle: ZAMG

Abbildung 5 Anderl M., Freudenschuß A., Friedrich A., et al., 2012: Austria's national inventory report 2012. Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and under the Kyoto Protocol. REP-0381, Wien. ISBN: 978-3-99004-184-0

Abbildung 6 Schleicher, St., 2014: Tracing the decline of EU GHG emissions. Impacts of structural changes of the energy system and economic activity. Policy Brief. Wegener Center for Climate and Global Change, Graz. Basierend auf Daten des statistischen Amtes der Europäischen Union (Eurostat)

Abbildung 7 Nach ADEME, 2007; US DoT, 2010; Der Boer et al., 2011; NTM, 2012; WBCSD, 2012, In Sims R., R. Schaeffer, F. Creutzig, X. Cruz-Núñez, M. D'Agosto, D. Dimitriu, M.J. Figueroa Meza, L. Fulton, S. Kobayashi, O. Lah, A. McKinnon, P. Newman, M. Ouyang, J.J. Schauer, D. Sperling, and G. Tiwari, 2014: Transport. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (Eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

Austrian Climate Change Assessment Report 2014

Summary for Policymakers

Austrian Climate Change Assessment Report 2014

Summary for Policymakers

Coordinating Lead Authors of the Summary for Policymakers
Helga Kromp-Kolb
Nebojsa Nakicenovic
Karl Steininger

Lead Authors of the Summary for Policymakers
Bodo Ahrens, Ingeborg Auer, Andreas Baumgarten, Birgit Bednar-Friedl, Josef Eitzinger, Ulrich Foelsche, Herbert Formayer, Clemens Geitner, Thomas Glade, Andreas Gobiet, Georg Grabherr, Reinhard Haas, Helmut Haberl, Leopold Haimberger, Regina Hitzenberger, Martin König, Angela Köppl, Manfred Lexer, Wolfgang Loibl, Romain Molitor, Hanns Moshammer, Hans-Peter Nachtnebel, Franz Prettenthaler, Wolfgang Rabitsch, Klaus Radunsky, Jürgen Schneider, Hans Schnitzer, Wolfgang Schöner, Niels Schulz, Petra Seibert, Rupert Seidl, Sigrid Stagl, Robert Steiger, Johann Stötter, Wolfgang Streicher, Wilfried Winiwarter

Translation
Bano Mehdi

Citation
APCC (2014): Summary for Policymakers (SPM). In: *Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14), Austrian Panel on Climate Change (APCC),* Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich.

Inhalt

Introduction

Over the course of a three-year process, Austrian scientists researching in the field of climate change have produced an assessment report on climate change in Austria following the model of the IPCC Assessment Reports. In this extensive work, more than 200 scientists depict the state of knowledge on climate change in Austria and the impacts, mitigation and adaptation strategies, as well as the associated known political, economic and social issues. The Austrian Climate Research Program (ACRP) of the *Klima- und Energiefonds* (Climate and Energy Fund) has enabled this work by financing the coordinating activities and material costs. The extensive and substantial body of work has been carried out gratuitously by the researchers.

This summary for policy makers provides the most significant general statements. First, the climate in Austria in the global context is presented; next the past and future climate is depicted, followed by a summary for Austria on the main consequences and measures. The subsequent section then provides more detail on individual sectors. More extensive explanations can be found – in increasing detail – in the synthesis report and in the full report (Austrian Assessment Report, 2014), both of which are available in bookstores and on the Internet.

The uncertainties are described using the IPCC procedure where three different approaches are provided to express the uncertainties depending on the nature of the available data and on the nature of the assessment of the accuracy and completeness of the current scientific understanding of the authors. For a **qualitative** estimation, the uncertainty is described using a two-dimensional scale where a relative assessment is given on the one hand for the quantity and the quality of evidence (i. e. information from theory, observations or models indicating whether an assumption or assertion holds true or is valid), and on the other hand to the degree of agreement in the literature. This approach uses a series of self-explanatory terms such as: high / medium / low evidence, and strong / medium / low agreement. The joint assessment of both of these dimensions is described by a confidence level using five qualifiers from „very high confidence" to „high", „medium", „low" and „very low confidence". By means of expert assessment of the correctness of the underlying data, models or analyses, a **quantitative** evaluation of the uncertainty is provided to assess the likelihood of the uncertainty pertaining to the outcome of the results using eight degrees of probability from „virtually certain" to „more unlikely than likely". The probability refers to the assessment of the likelihood of a well-defined result which has occurred or will occur in the future. These can be derived from quantitative analyses or from expert opinion. For more detailed information please refer to the Introduction chapter in AAR14. If the description of uncertainty pertains to a whole paragraph, it will be found at the end of it, otherwise the uncertainty assessment is given after the respective statement.

The research on climate change in Austria has received significant support in recent years, driven in particular by the *Klima- und Energiefonds* (Climate and Energy Fund) through the ACRP, the Austrian Science Fund (FWF) and the EU research programs. Also own funding of research institutions has become a major source of funding. However, many questions still remain open. Similar to the process at the international level, a periodic updating of the Austrian Assessment Report would be desirable to enable the public, politicians, administration, company managers and researchers to make the best and most effective decisions pertaining to the long-term horizon based on the most up-to-date knowledge.

The Global Context

With the progress of industrialization, significant changes to the climate can be observed worldwide. For example, in the period since 1880 the global average surface temperature has increased by almost 1 °C. In Austria, this warming was close to 2 °C, half of which has occurred since 1980. These changes are mainly caused by the anthropogenic emissions of greenhouse gases (GHG) and other human activities that affect the radiation balance of the earth. The contribution of natural climate variability to global warming most likely represents less than half of the change. The comparably small increase in global average temperature since 1998 is likely attributed to natural climate variability.

Without extensive additional measures to reduce emissions one can expect a global average surface temperature rise of 3–5 °C by 2100 compared to the first decade of the 20th century (see Figure 1). Following this increase, self-reinforcing processes (feedback loops), such as the ice-albedo feedback or additional release of greenhouse gases due to the thawing of permafrost in the Arctic regions will play an important role (see Volume 1, Chapter 1; Volume 3, Chapter 1)[1].

[1] The full text of the Austrian Assessment Report AAR14 is divided into three volumes, which are further divided into chapters. Information and reference to the relevant section of the AAR14 is provided with the number of the volume (Band) and the respective chapter (Kapitel) where more detailed information can be found pertaining to the summary statements.

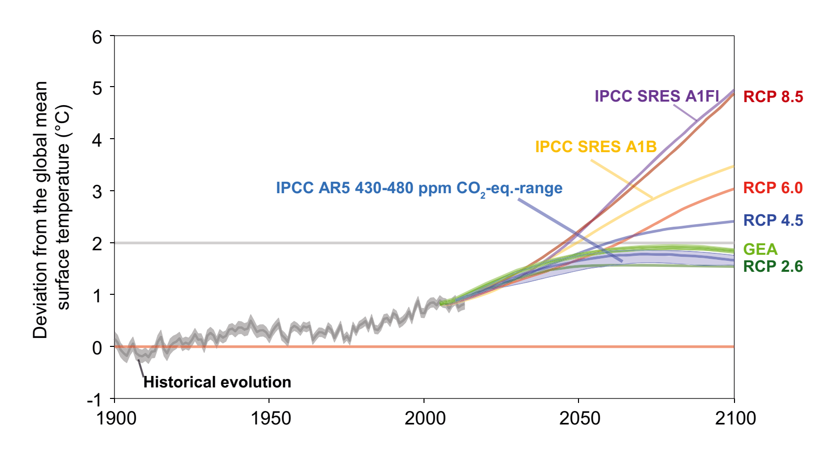


Figure 1 Global mean surface temperature anomalies (°C) relative to the average temperature of the first decade of the 20th century, historical development, and four groups of trends for the future: two IPCC SRES scenarios without emission reductions (A1B and A1F1), which show temperature increases to about 5 °C or just over 3 °C to the year 2100, and four new emission scenarios, which were developed for the IPCC AR5 (RCP8, 5, 6.0, 4.5 and 2.6), 42 GEA emission reduction scenarios and the range of IPCC AR5 scenarios which show the temperature to stabilize in 2100 at a maximum of +2 °C. Data sources: IPCC SRES (Nakicenovic et al., 2000), IPCC WG I (2014) und GEA (2012)

Climate change and the associated impacts show large regional differences. For example, the Mediterranean region can expect a prominent decrease in precipitation as well as associated water availability (see Volume 1, Chapter 4). While, considering the highest emission scenario of a rise in mean sea level of the order 0.5–1 m by the end of the century compared to the current level poses considerable problems in many densely populated coastal regions (see Volume 1 Chapter 1).

Since the consequences of unbridled anthropogenic climate change would be accordingly serious for humanity, internationally binding agreements on emissions reductions are already in place. In addition, many countries and groups including the United Nations („Sustainable Development Goals"), the European Union, the G-20 as well as cities, local authorities and businesses have set further-reaching goals. In the Copenhagen Accord (UNFCCC Copenhagen Accord) and in the EU Resolution, a goal to limit the global temperature increase to 2 °C compared to pre-industrial times is considered as necessary to limit dangerous climate change impacts. However, the steps taken by the international community on a voluntary basis for emission reduction commitments are not yet sufficient to meet the 2 °C target. In the long-term, an almost complete avoidance of greenhouse gas emissions is required, which means converting the energy supply and the industrial processes, to cease deforestation, and also to change land use and lifestyles (see Volume 3, Chapter 1; Volume 3, Chapter 6).

The likelihood of achieving the 2 °C target is higher if it is possible to achieve a turnaround by 2020 and the global greenhouse gas emissions by 2050 are 30–70 % below the 2010 levels. (see Volume 3, Chapter 1; Volume 3, Chapter 6). Since industrialized countries are responsible for most of the historical emissions – and have benefited from them and hence are also economically more powerful – Article 4 of the UNFCCC suggests that they should contribute to a disproportionate share of total global emission reduction. In the EU „Roadmap for moving to a competitive low-CO_2 economy in 2050" a reduction in greenhouse gas emissions by 80–95 % compared to the 1990 level is foreseen. Despite of the fact that no emission reduction obligations were defined for this period for individual Member States, Austria can expect a reduction commitment of similar magnitude.

Climate Change in Austria: Past and Future

In Austria, the temperature in the period since 1880 rose by nearly 2 °C, compared with a global increase of 0.85 °C. The increased rise is particularly observable for the period after 1980, in which the global increase of about 0.5 °C is in contrast to an increase of approximately 1 °C in Austria (virtually certain, see Volume 1, Chapter 3).

A further temperature increase in Austria is expected (very likely). In the first half of the 21st century, it equals approximately 1.4 °C compared to current temperature, and is not greatly affected by the different emission scenarios due to the inertia in the climate system as well as the longevity of greenhouse gases in the atmosphere. The temperature development thereafter, however, is strongly dependent on anthropogenic greenhouse gas emissions in the years ahead now, and can therefore be steered (very likely, see Volume 1, Chapter 4).

The development of precipitation in the last 150 years shows significant regional differences: In western Austria, an increase in annual precipitation of about 10-15 % was recorded, in the southeast, however, there was a decrease in a similar order of magnitude (see Volume 1, Chapter 3).

In the 21st century, an increase of precipitation in the winter months and a decrease in the summer months is to be expected (likely). The annual average shows no clear trend signal, since Austria lies in the larger transition region between two zones with opposing trends – ranging from an increase in

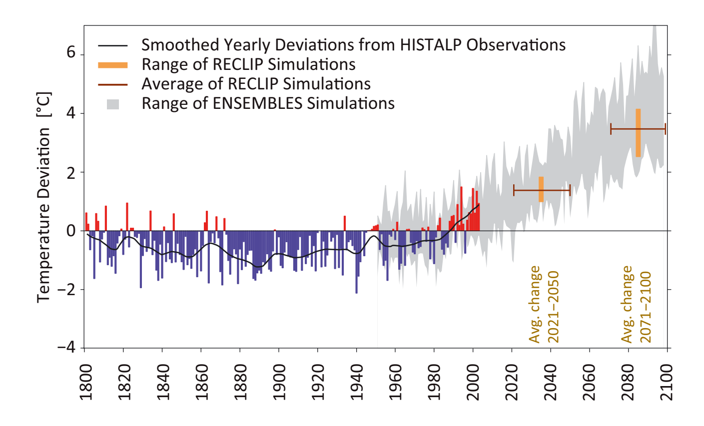


Figure 2 Mean surface air temperature (°C) in Austria from 1800 to 2100, expressed as a deviation from the mean temperature for the period 1971 to 2000. Measurements to the year 2010 are illustrated in color, model calculations for one of the IPCC emissions scenarios with higher GHG emissions (IPCC SRES A1B scenario) in gray. Reproduced are annual means (columns) and the 20-year smoothed curve (line). You can see the temperature drop just before 1900 and the sharp rise in temperature (about 1 °C) since the 1980s. In this scenario, by the end of the century, a rise in temperature of 3.5 °C can be expected (RECLIP simulations). Source: ZAMG

North Europe to a decrease in the Mediterranean (likely, see Volume 1, Chapter 4).

In the last 130 years, the annual sunshine duration has increased for all the stations in the Alps by approximately 20 % or more than 300 hours. The increase in the summer half of the year was stronger than in the winter half of the year (virtually certain, see Volume 1, Chapter 3). Between 1950 and 1980 there was an increase in cloud cover and increased air pollution, especially in the valleys due to a significant decrease in the duration of sunshine hours in the summer (see Volume 1, Chapter 3).

The duration of snow cover has been reduced in recent decades, especially in mid-altitude elevations (approximately 1 000 m above sea level) (very likely, see Volume 2, Chapter 2). Since both the snow line, and thus also the snowpack, as well as the snowmelt are temperature dependent, it is expected that a further increase in temperature will be associated with a decrease in snow cover at mid-altitude elevations (very likely, see Volume 2, Chapter 2).

All observed glaciers in Austria have clearly shown a reduction in surface area and in volume in the period since 1980. For example, in the southern Ötztal Alps, the largest contiguous glacier region of Austria, the glacier area of 144.2 km² in the year 1969 has decreased to 126.6 km² in 1997 and to 116.1 km² in 2006 (virtually certain, see Volume 2, Chapter 2). The Austrian glaciers are particularly sensitive in the retraction phase to summer temperatures since 1980, therefore a further decline of the glacier surface area is expected (very likely). A further increase in the permafrost elevation is expected (very likely, see Volume 2, Chapter 4).

Temperature extremes have changed markedly, so that for example, cold nights are rarer, but hot days have become more common. In the 21st century, this development will intensify and continue, and thus the frequency of heat waves will also increase (very likely, see Volume 1, Chapter 3; Volume 1, Chapter 4,). For extreme precipitation, no uniform trends are detectable as yet (see Volume 1, Chapter 3). However, climate models show that heavy and extreme precipitation events are likely to increase from autumn to spring (see Volume 1, Chapter 4). Despite some exceptional storm events in recent years, a long-term increase in storm activity cannot be detected. Also for the future, no change in storm frequency can be derived (see Volume 1, Chapter 3; Volume 1, Chapter 4).

Summary for Austria: Impacts and Policy Measures

The economic impact of extreme weather events in Austria are already substantial and have been increasing in the last three decades (virtually certain, see Volume 2, Chapter 6). In the last three decades, the emergence of damage costs due to extreme events suggests that changes in the frequency and intensity of such damaging events have significant impact on the economy of Austria.

The potential economic impacts of the expected climate change in Austria are mainly determined by extreme events and extreme weather periods (medium confidence, see Volume 2, Chapter 6). In addition to extreme events, gradual temperature and precipitation changes also have economic ramifications, such as the shifting potential yields in agriculture, in the energy sector, or on snow-reliability in ski areas with corresponding impacts on winter tourism.

In mountainous regions, significant increases in landslides, mudflows, rockfalls and other gravitational mass movements will occur (very likely, high confidence). This is due to changes in rainfall, thawing permafrost and retreating glaciers, but also to changes in land use (very likely, high confidence). Mountain flanks will be vulnerable to events such as rockfall (very likely, high confidence, see Volume 2, Chapter 4) and landslides (likely, medium confidence, see Volume 2, Chapter 4), and debris masses that were previously fixed by permafrost will be mobilized by debris flows (most likely high confidence, see Volume 2, Chapter 4).

The risk of forest fires will increase in Austria. The risk of forest fires will increase due to the expected warming trend and

the increasing likelihood of prolonged summer droughts (very likely, high confidence, see Volume 2, Chapter 4).

Changes to sediment loads in river systems are noticeable. Due to changes in the hydrological and in the sediment regimes (mobilization, transport and deposition) major changes can be expected in mountain torrents and in large river systems (very likely, high confidence, see Volume 2, Chapter 4). The decisive factor here is to distinguish between changes due to climate change and due to human impact.

Due to the currently foreseeable socio-economic development and climate change, the loss potential due to climate change in Austria will increase for the future (medium confidence, see Volume 2, Chapter 3; Volume 2, Chapter 6). A variety of factors determine the future costs of climate change: In addition to the possible change in the distribution of extreme events and gradual climate change, it is mainly socio-economic and demographic factors that will ultimately determine the damage costs. These include, amongst others, the age structure of the population in urban areas, the value of exposed assets, the development of infrastructure for example in avalanche or landslide endangered areas, as well as overall land use, which largely control the vulnerability to climate change.

Without increased efforts to adapt to climate change, Austria's vulnerability to climate change will increase in the decades ahead (high confidence, see Volume 2, Chapter 6). In Austria climate change particularly influences the weather-dependent sectors and areas such as agriculture and forestry, tourism, hydrology, energy, health and transport and the sectors that are tied into these (high confidence, see Volume 2, Chapter 3). It is assumed that adaptation measures can somewhat mitigate the negative impacts of climate change, but they cannot fully offset them (medium confidence, see Volume 3, Chapter 1).

In 2013 Austria adopted a national adaptation strategy specifically in order to cope with the consequences of climate change (see Volume 3, Chapter 1). The effectiveness of this strategy will be measured principally by how successful individual sectors, or rather policy areas, will be in the development of appropriate adaptation strategies and their implementation. The criteria for their evaluation, such as a regular survey of the effectiveness of adaptation measures, as other nations have already implemented, do not yet exist in Austria.

In 2010 the greenhouse gas emissions in Austria amounted to a total of approximately 81 Mt CO_2-equivalents (CO_2-eq.) or 9.7 t CO_2-eq. per capita (very high confidence, see Volume 1, Chapter 2)**.** These figures take into account the emission contribution of land-use changes through the carbon uptake of ecosystems. The Austrian per capita emissions are slightly higher than the EU average of 8.8 t CO_2-eq. per capita per year and significantly higher than those for example of China (5.6 t CO_2-eq. per capita per year), but much lower than those of the U.S. (18.4 t CO_2-eq. per person per year) (see Volume 1, Chapter 2). Austria has made commitments in the Kyoto Protocol to reduce its emissions. After correcting for the part of the carbon sinks that can be claimed according to the agreement, the emissions for the commitment period 2008 to 2012 were 18.8 % higher than the reduction target of 68.8 M CO_2-eq. per year (see Volume 3, Chapter 1).

By also accounting for the Austrian consumption-related CO_2-emissions abroad, the emission values for Austria are almost 50 % higher (high confidence Volume 3, Chapter 5). Austria is a contributor of emissions in other nations. Incorporating these emissions on the one hand, and adjusting for the Austrian export-attributable emissions on the other hand, one arrives at the „consumption-based" emissions of Austria. These are significantly higher than the emissions reported in the previous paragraph, and in the UN statistics reported for Austria, and this tendency is increasing (in 1997 they were 38 % and in 2004 they were 44 % higher than those reported). From the commodity flows it can be inferred that Austrian imports are responsible for emissions particularly from south Asia and from east Asia, specifically China, and from Russia (see Figure 3).

The national greenhouse gas emissions have increased since 1990, although under the Kyoto Protocol Austria has committed to a reduction of 13 % over the period 2008 to 2012 compared to 1990 (virtually certain, see Volume 3, Chapter 1; Volume 3, Chapter 6). The Austrian goal was set relatively high compared to other industrialized countries. The official implementation of this reduction target for 2008 to 2012 was achieved through the purchase of emission rights abroad amounting to a total of about 80 Mt CO_2-eq. for at least € 500 million (very high confidence, see Volume 3, Chapter 1).

In Austria, efforts are underway to improve energy efficiency and to promote renewable energy sources; however, the objectives pertaining to renewables and energy efficiency are not sufficiently backed by tangible measures to make them achievable. Thus, in 2010 an energy strategy was released which proposes that the final energy consumption in 2020 should not exceed the level of 2005; an amount of 1 100 PJ. However, this has not yet been implemented with adequate measures. Austria's Environment Energy Law (*Ökostromgesetz*) stipulates that an additional power generation of 10.5 TWh (37.8 PJ) per year to 2020, should stem from renewable sour-

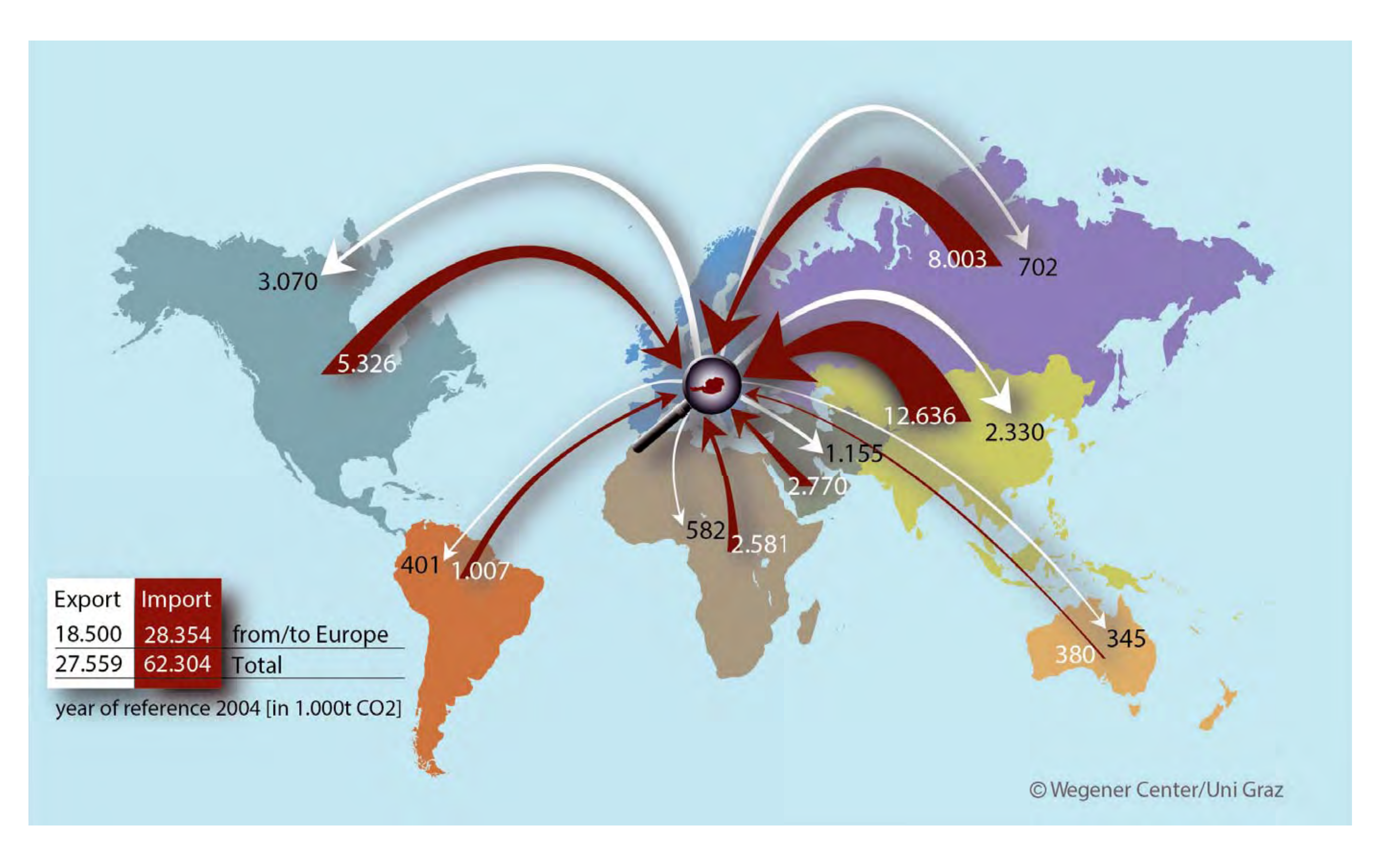


Figure 3 CO_2 streams from the trade of goods to / from Austria according to major world regions. The emissions implicitly contained in the imported goods are shown with red arrows, the emissions contained in the exported goods, attributed to Austria, are shown with white arrows. Overall, south Asia and east Asia, particularly China, and Russia, are evident as regions from which Austria imports emission-intensive consumer- and capital- goods. Source: Munoz and Steininger (2010)

ces. The energy sector and the industry are largely regulated under the „EU ETS“, which is currently negotiating further refinement. In particular, the transport sector currently lacks effective measures.

Austria has set only short-term reduction targets for its climate and energy program, namely for the period up to 2020 (see Volume 3, Chapter 1; Volume 3, Chapter 6). This corresponds to the binding EU targets, but to adequately tackle the problem other countries have set longer-term GHG reduction targets. For example, Germany has set a reduction target of 85 % to 2050. The UK intends to achieve a reduction of 80 % by 2050 (see Volume 3, Chapter 1).

The measures taken so far to meet the expected contribution of Austria to achieve the global 2 °C target are insufficient (high confidence, see Volume 3, Chapter 1; Volume 3, Chapter 6). The actions specified by Austria are based on the objectives for the year 2020; the goals for developing renewable energy sources in Austria are not sufficiently ambitious and are likely to be achieved well before 2020, while it is unlikely that an actual change in emission trends will be achieved in the industrial and transport sectors, while the turnaround that has already taken place for space heating is likely to be insufficient (see Volume 3, Chapter 3; Volume 3, Chapter 5). The expected greenhouse gas emissions savings due to the replacement of fossil fuels with biofuels are increasingly being called into question (see Volume 3, Chapter 2).

Institutional, economic, social and knowledge barriers slow progress with respect to mitigation and adaptation. Measures to eliminate or overcome these barriers include a reforming of administrative structures with respect to relevant tasks at hand, such as the pricing of products and services according to their climate impact. A key factor in this regard includes an abolition of environmentally harmful financing and subsidies; for example, for the exploration of new fossil reserves, or the commuter support which favors the use of the cars, or housing subsidies for single-family homes in the urban vicinity. Also, having a strong involvement of civil society and of science in the decision-making processes can accelerate necessary measures. Relevant knowledge gaps should be addressed because they also delay further action, however they do not belong to the most important factors (high confidence, see Volume 3, Chapter 1; Volume 3, Chapter 6).

According to scenario simulations, emission reductions of up to 90% can be achieved in Austria by 2050 through additional implementation measures (high confidence, see Volume 3, Chapter 3; Volume 3, Chapter 6). These scenarios are obtained from studies that focus on the energy supply and demand. However currently, there is a lack of clear commitment on the part of the decision-makers to emission reductions of such a magnitude. In addition, so far there is no clear perception pertaining to the financial or other economic and social framework conditions on how the listed objectives could be achieved. In addition to technological innovations, far-reaching economic and socio-cultural changes are required (e.g. in production, consumption and lifestyle).

According to the scenarios, the target set by the EU can be achieved by halving the energy consumption in Austria by 2050. It is expected that the remaining energy demand can be covered by renewable energy sources. The economically available potential of renewable resources within Austria is quantified at approximately 600 PJ. As a comparison, the current final energy consumption is 1 100 PJ per year (see Volume 3, Chapter 3). The potential to improve energy efficiency exists, particularly in the sectors of buildings, transportation and production (high confidence, see Volume 3, Chapter 3; Volume 3, Chapter 5).

Striving for a swift and serious transformation to a carbon-neutral economic system requires a cross-sectoral closely coordinated approach with new types of institutional cooperation in an inclusive climate policy. The individual climate mitigation strategies in the various economic sectors and related areas are not sufficient. Other types of transformations should also be taken into account, such as those of the energy system, because decentralized production, storage and control system for fluctuating energy sources and international trade are gaining in importance (medium confidence, see Volume 3, Chapter 3). Concurrently, numerous small plant operators with partially new business models are entering the market.

An integrative and constructive climate policy contributes to managing other current challenges. One example is economic structures become more resistant with respect to outside influences (financial crisis, energy dependence). This means the intensification of local business cycles, the reduction of international dependencies and a much higher productivity of all resources, especially of energy (see Volume 3, Chapter 1).

The achievement of the 2050 targets only appears likely with a paradigm shift in the prevailing consumption and behavior patterns as well as leaving the traditional short-term oriented policies and decision-making processes (high confidence, see Volume 3, Chapter 6). Sustainable development approaches which contribute both to a drastic departure from historical trends as well as individual sector-oriented strategies and business models can contribute to the required GHG reductions (probably, see Volume 3, Chapter 6). New integrative approaches in terms of sustainable development require not necessarily novel technological solutions, but also a conscious reorientation of established, harmful lifestyle habits and in the behavior of economic stakeholders. Worldwide, there are initiatives for transformations in the direction of sustainable development paths, such as the energy turnaround in Germany (*Energiewende*), the UN initiative „Sustainable Energy for All“, a number of „Transition Towns“ or the „Slow Food“ movement and the vegetarian diet. Only the future will show which initiatives will be successful (see Volume 3, Chapter 6).

Demand-side measures such as changes in diet, regulations and reduction of food losses will play a key role in climate protection. Shifting to a diet based on dominant regional and seasonal plant-based products, with a significant reduction in the consumption of animal products can make a significant contribution to greenhouse gas reduction (most likely high confidence). The reduction of losses in the entire food life cycle (production and consumption) can make a significant contribution to greenhouse gas reduction. (very likely, medium confidence).

The necessary changes required to attain the targets include the transformation of economic organizational forms and orientations (high confidence, see Volume 3, Chapter 6). The housing sector has a high need for renewable energy; new or renovated buildings can be strengthened through new financing mechanisms. The fragmented transport system can be further developed into an integrated mobility system. In terms of production, when it comes to new products, processes and materials can be used that also ensure Austria is not left behind in the global competition. The energy system can be aligned along the perspective of energy services in an integrated manner.

In a suitable political framework, the transformation can be promoted (high confidence, see Volume 3, Chapter 1; Volume 3, Chapter 6). In Austria, there is a willingness to change. Pioneers (individuals, businesses, municipalities, regions) are implementing their ideas already, for example in the field of energy services, or climate-friendly mobility and local supply. Such initiatives can be strengthened through policies that create a supportive environment.

New business and financing models are essential elements of the transformation. Financing instruments (beyond the funding primarily used so far) and new business models re-

late mainly to the conversion of the energy selling enterprise to specialists for energy services. The energy efficiency can be significantly increased and made profitable, legal obligations can drive building restoration, collective investments in renewable or efficiency measures can be made possible by adapting legal provisions. Communication policy and regional planning can facilitate the use of public transport and emission-free transport, such as is the case for example in Switzerland (see Volume 3, Chapter 6). Long-term financing (for buildings for example 30 to 40 years), which are especially endowed by pension funds and insurance companies can facilitate new infrastructure. The required transformation has global dimensions therefore the joint benefits abroad should be discussed, including provisions for the Framework Convention Climate Fund.

Major investments in infrastructure with long lifespans limit the degrees of freedom in the transformation to sustainability if greenhouse gas emissions and adaptation to climate change are not considered. If all projects had a „climate-proofing“ subject to consider integrated climate change mitigation and appropriate adaptation strategies, this would avoid so-called „lock-in effects“ that create long-term emission-intensive path dependencies (high confidence, see Volume 3, Chapter 6). The construction of coal power plants is an example. Nationwide this includes the disproportionate weighting of road expansion, the construction of buildings which do not meet achievable – yet with justifiable expenses-ecological standards, and disproportionate regional planning inducing excessive traffic.

A key area of transformation is related to cities and densely settled areas (high confidence, see Volume 3, Chapter 6). The potential synergies in urban areas that can be used in many cases to protect the climate are attracting greater attention. These include, for example, efficient cooling and heating of buildings, shorter routes and more efficient implementation of public transport, easier access to training or education and thus accelerated social transformation.

Climate-relevant transformation is often directly related to health improvements and accompanied by an increase in the quality of life (high confidence, see Volume 3, Chapter 4; Volume 3, Chapter 6). For the change from car to bike, for example, a positive-preventive impact on cardiovascular diseases has been proven, as have been further health-improving effects, that significantly increased life expectancy, in addition to positive environmental impacts. Health supporting effects have also been proven for sustainable food (e. g. reduced meat consumption).

Climate change will increase the migration towards Austria. Migration has many underlying causes. In the southern hemisphere, climate change will have particularly strong impacts and will be a reason for increased migration. This will mainly affect migration within the southern countries. The IPCC estimates that by 2020 in Africa and Asia alone 74 million to 250 million people will be affected. Due to the African continent being particularly impacted, refugees from Africa to Europe are expected to increase (Volume 3, Chapter 4).

Climate change is only one of many global challenges, but a very central one (very high confidence, see Volume 2, Chapter 6; Volume 3, Chapter 1; Volume 3, Chapter 5). A sustainable future also deals with for example issues of combating poverty, health, social human resources, the availability of water and food, having intact soils, the quality of the air, loss of biodiversity, as with ocean acidification and overfishing (very high confidence, see Volume 3, Chapter 6). These questions are not independent of each other: climate change often exacerbates the other problems. And therefore it often affects the most vulnerable populations the most severely. The community of states has triggered a UN process to formulate sustainable development goals after 2015 (Sustainable Development Goals). Climate change is at the heart of these targets and many global potential conflict areas. Climate mitigation measures can thus generate a number of additional benefits to achieve further global objectives (high confidence, see Volume 3, Chapter 6).

Impacts on Sectors and Measures of Mitigation and Adaptation

Soils and Agriculture

Climate change is leading to the loss of humus and to greenhouse gas emissions from the soil. Temperature rise, temperature extremes and dry periods, more pronounced freezing and thawing in winter as well as strong and long drying out of the soil followed by heavy precipitation enhance certain processes in the soil. This can lead to an impairment of soil functions, such as soil fertility, water and nutrient storage capacity, humus depletion causing soil erosion, and others. This results in increased greenhouse gas emissions from soil (very likely, see Volume 2, Chapter 5).

Human intervention increases the area of soils with a lower resilience to climate change. Soil sealing and the consequences of unsuitable land use and management such as compaction, erosion and loss of humus further restrict soil functions and reduce the soil's ability to buffer the effects of climate change (very likely, see Volume 2, Chapter 5).

The impacts of climate change on agriculture vary by region. In cooler, wetter areas – for example, in the northern foothills of the Alps – a warmer climate mainly increases the average potential yield of crops. In precipitation poorer areas north of the Danube and in eastern and south-eastern Austria, increasing drought and heat-stress reduces the long term average yield potential, especially of non-irrigated crops, and increase the risk of failure. The production potential of warm tolerant crops, such as corn or vineyards, will expand significantly (very likely, see Volume 2, Chapter 3).

Heat tolerant pests will propagate in Austria. The damage potential of agriculture through – in part newly emerging – heat tolerant insects will increase. Climate change will also alter the occurrence of diseases and weeds (very likely, see Volume 2, Chapter 3).

Livestock will also suffer from climate change. Increasing heat waves can reduce the performance and increase the risk of disease in farm animals (very likely, see Volume 2, Chapter 3).

Adaptation measures in the agricultural sector can be implemented at varying rates. Within a few years measures such as improved evapotranspiration control on crop land (e. g. efficient mulch cover, reduced tillage, wind protection), more efficient irrigation methods, cultivation of drought or heat-resistant species or varieties, heat protection in animal husbandry, a change in cultivation and processing periods as well as crop rotation, frost protection, hail protection and risk insurance are feasible (very likely, see Volume 3, Chapter 2).

In the medium term, feasible adaptation measures include soil and erosion protection, humus build up in the soil, soil conservation practices, water retention strategies, improvement of irrigation infrastructure and equipment, warning, monitoring and forecasting systems for weather-related risks, breeding stress-resistant varieties, risk distribution through diversification, increase in storage capacity as well as animal breeding and adjustments to stable equipment and to farming technology (very likely, see Volume 3, Chapter 2).

The shifts caused by a future climate in the suitability for the cultivation of warmth-loving crops (such as grain corn, sunflower, soybean) is shown in Figure 4 for the example of grapes for wine production. Many other heat tolerant crops such as corn, sunflower or soybean show similar expansions in their cultivation suitability for future climate as is shown here in the case of wine (see Volume 2, Chapter 3).

Agriculture can reduce greenhouse gas emissions in a variety of ways and enhance carbon sinks. By remaining at current production volume levels, the greatest potentials lie in the areas of ruminant nutrition, fertilization practices, reduction of nitrogen losses and increasing the nitrogen efficiency (very likely, see Volume 3, Chapter 2). Sustainable strategies for reducing greenhouse gas emissions in agriculture require resource-saving and efficient management practices involving organic farming, precision farming and cultivating whilst conserving genetic diversity (probably, see Volume 3, Chapter 2).

Forestry

A warmer and drier climate will strongly impact the biomass productivity of Austrian forests. Due to global warming, the biomass productivity increases in mountainous areas and in regions that receive sufficient precipitation. However, in eastern and northeastern lowlands and in inner-alpine basins, the productivity declines, due to more dry periods (high agreement, robust evidence, see Volume 2, Chapter 3; Volume 3, Chapter 2).

In all of the examined climate scenarios, the disturbances to forest ecosystems are increasing in intensity and in frequency. This is particularly true for the occurrence of heat-tolerant insects such as the bark beetle. In addition, further types of damage can be expected from harmful organisms that have been introduced or that have migrated from southern regions. Abiotic disturbances such as storms, late and early frosts, wet snow events or wildfires could also cause greater damages than before (high uncertainty). These disturbances can also trigger outbreaks and epidemics of major forest pests, such as the bark beetle. Disturbances lead to lower revenues for wood production. The protective function of the forests against events such as rockfalls, landslides, avalanches as well as carbon storage decreases (high agreement, robust evidence, see Volume 2, Chapter 2; Volume 3, Chapter 2).

For decades Austria's forests have been a significant net sink for CO_2. Since approximately 2003, the net CO_2 uptake of the forest has declined and in some years has come to a complete standstill; this is due to higher timber harvests, natural disorders and other factors. In addition to the GHG impacts of increased felling, a comprehensive greenhouse gas balance of different types of forest management and use of forest products requires considering the carbon storage in long-lived wood products such as the GHG savings of other emission-intensive products that can be replaced by wood (e. g. fossil fuel, steel, concrete) as well. A final assessment of the systemic effects would require more accurate and comprehensive analyzes than those that currently exist (see Volume 3, Chapter 2).

The resilience of forests to risk factors as well as the adaptability of forests can be increased. Examples of adaptation measures are small patches of forest land, site suitable for mixed stands, and ensuring the natural forest regeneration in

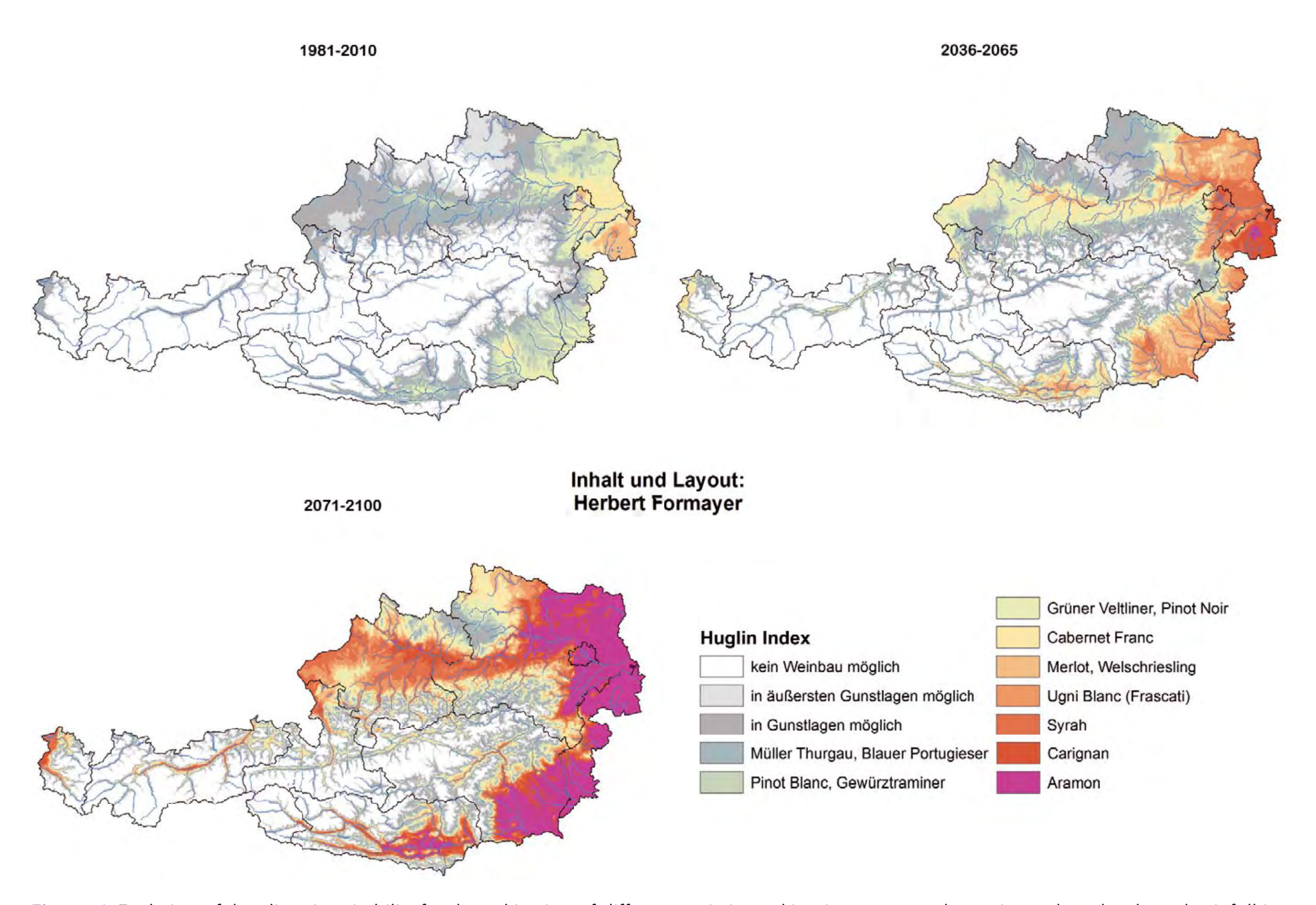


Figure 4 Evolution of the climatic suitability for the cultivation of different varieties, taking into account the optimum heat levels and rainfall in Austria in the past climate (observed) and a climate scenario until the end of the 21st century (modelled). The color shades from blue to yellow to purple indicate increasing heat amounts exclusively based on the corresponding variety classification. One can clearly see the increasing suitability for red wines, towards the end of the century as there are extremely heat-loving varieties. Source: Eitzinger and Formayer (2012)

protected forests through adapted game management. The most sensitive areas are the spruce stands in mixed deciduous forest sites located in lowlands, and spruce monocultures in mountain forests serving a protective function. The adaptation measures in the forest sector are associated with considerable lead times (high agreement, robust evidence, see Volume 3, Chapter 2).

Biodiversity

Ecosystems that require a long time to develop, as well as alpine habitats located above the treeline are particularly impacted by climate change (high agreement, robust evidence, see Volume 2, Chapter 3). Bogs and mature forests require a long time to adapt to climate change and are therefore particularly vulnerable. Little is known about the interaction with other elements of global change, such as land use change or the introduction of invasive species. The adaptive capacity of species and habitats has also not been sufficiently researched.

In alpine regions, cold-adapted plants can advance to greater heights and increase the biodiversity in these regions. Cold-adapted species can survive in isolated micro-niches in spite of the warming (high agreement, robust evidence). However, increasing fragmentation of populations can lead to local extinctions. High mountains native species that have adapted to lower peripheral regions of the Alps are particularly affected (medium agreement, medium evidence, see Volume 2, Chapter 3).

Animals are also severely affected. In the animal kingdom, changes over the course of the year are already documented, such as the extension of activity periods, increased successions of generations, the advancement in the arrival of migratory birds, as well as shifts in distribution ranges northward or to higher elevations of individual species. Climate change will further advantage some animal species, especially generalists, and further endanger others, especially specialists (medium

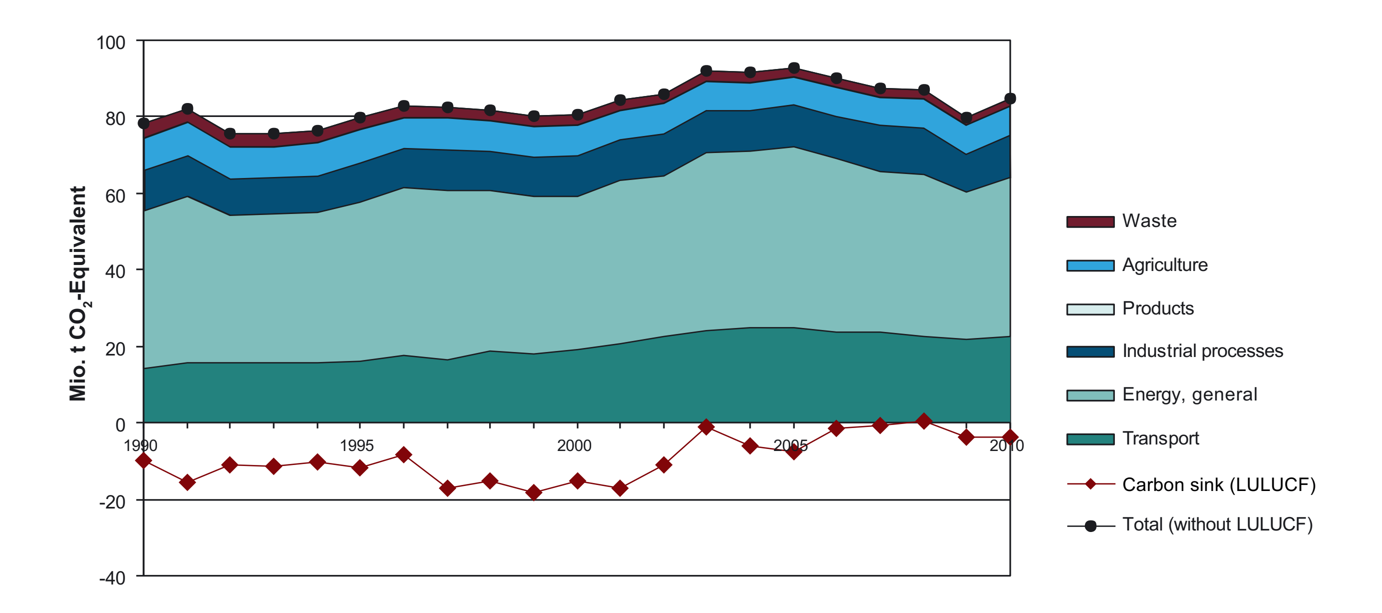


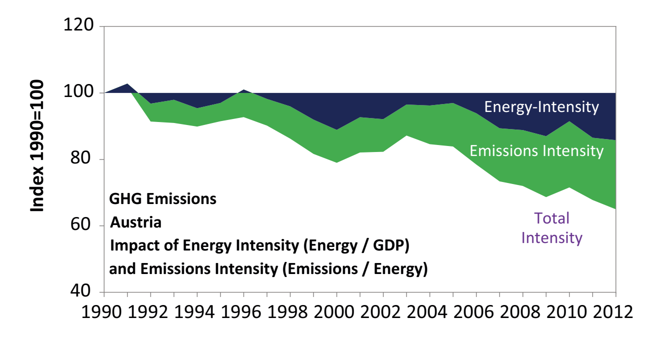
Figure 5 Officially reported greenhouse gas emissions in Austria (according to the IPCC source sectors with especially defined emissions for the Transport sector). The brown line that is mainly below the zero line represents carbon sinks. The sector „Land use and land use change" (LULUCF) represents a sink for carbon and is therefore depicted below the zero line. In recent years, this sink was significantly smaller and no longer present in some years. This was mainly a result of higher felling; and changes to the survey methods contributed to this as well. Source: Anderl et al. (2012)

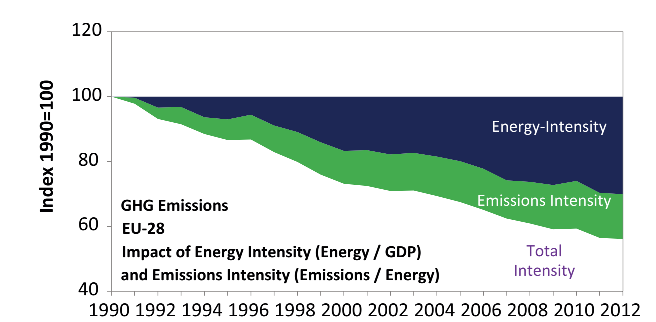
evidence, see Volume 2, Chapter 3). The warming of upstream river reaches leads to a theoretical shift in the fish habitat by up to 30 km. For brown trout and grayling for example, the number of suitable habitats will decline (high agreement, robust evidence, see Volume 2, Chapter 3).

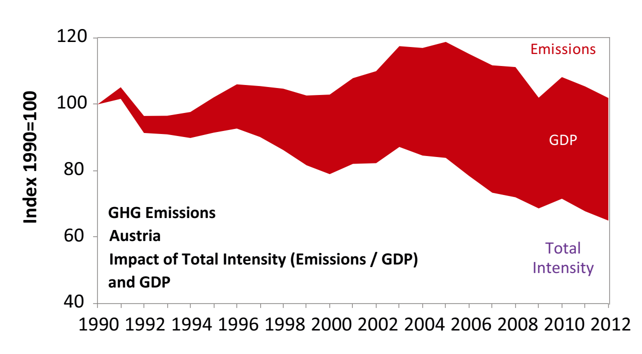
Energy

Austria has a great need to catch up on improvements in energy intensity. In the last two decades, unlike the EU average, Austria has made little progress in terms of improvements to energy intensity (energy consumption per GDP in Euro, see Figure 6). Since 1990, the energy intensity of the EU-28 decreased by 29 % (in the Netherlands by 23 %, Germany by 30 % and in the UK by 39 %). In Germany and the UK, however some of these improvements are due to the relocation of energy-intensive production abroad. In terms of emission intensity (GHG emissions per PJ energy) the improvements in Austria since 1990 are a reflection of the strong development of renewables; here, Austria along with The Netherlands, counts among the countries with the strongest improvements. These two indicators together determine the greenhouse gas emission intensity of the gross domestic product (GDP), which in Austria as well as in the EU-28 has also declined since 1990. Greenhouse gas emissions have increased more slowly than GDP. However, in comparison with the EU-28 it becomes evident that Austria must make major strides to catch up in reducing energy intensity (see Volume 3, Chapter 1).

The potential renewable energy sources in Austria are not currently fully exploited. In Austria, the share of renewable energy sources in the gross final energy consumption has increased from 23.8 % to 31 % between 2005 and 2011, primarily due to the development of biogenic fuels, such as pellets and biofuels. In the future, wind and photovoltaics can make a significant contribution. The target for 2020, for a 34 % share in end energy use of renewable energies can be easily achieved with the current growth rates. However, for the required medium-term conversion to a greenhouse gas neutral energy system by 2050, a coverage of the entire energy demand with renewable energy sources is necessary. To avoid a mere shifting of the problem, before any further future expansion of hydroelectric power or increased use of biomass takes place, it is important to examine the total greenhouse gas balances as well as to take into account indirect and systemic effects. Other environmental objectives do not lose their importance in an effort to protect the climate (see Volume 3, Chapter 3; Volume 3, Chapter 6).







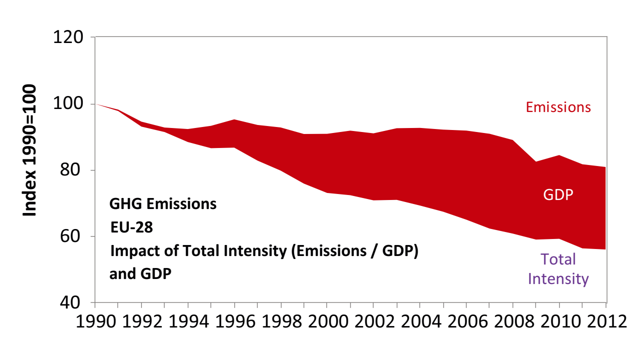


Figure 6 Development of GHG intensity of GDP and the subdevelopments of energy intensity (energy consumption per GDP in Euro) and emission intensity of energy (greenhouse gas emissions per PJ of energy) over time for Austria and for the EU-28 (upper panel). The development of greenhouse gas emission intensity in conjunction with rising GDP (lower panel) leads to rising greenhouse gas emissions for Austria (+5 %), and declining emissions for the EU-28 (−18 %) during this period; Source: Schleicher (2014)

Transport and Industry

Of all sectors, the greenhouse gas emissions increased the most in the last two decades in the transport sector by +55 % (very high confidence, see Volume 3, Chapter 3). Efficiency gains made in vehicles were largely offset by heavier and more powerful vehicles as well as higher transport performance. However, the limitation of CO_2 emissions per kilometer driven for passenger cars and vans are beginning to bear fruit (see Volume 3, Chapter 3). Price changes undertaken for public transportation and (tangible) price signals have had demonstrable effects on the share of private vehicle transport in Austria.

To achieve a significant reduction in greenhouse gas emissions from passenger transport, a comprehensive package of measures is necessary. Keys to achieving this are marked reductions in the use of fossil-fuel energy sources, increasing energy efficiency and changing user behaviour. A prerequisite is improved economic- and settlement- structures in which the distances to travel are minimized. This may strengthen the environmentally friendly forms of mobility used, such as walking and cycling. Public transportation systems are to be expanded and improved, and their CO_2 emissions are to be minimized. Technical measures for car transport include further, massive improvements in efficiency for vehicles or the use of alternative power sources (Volume 3, Chapter 3) – provided that the necessary energy is also produced with low emissions.

Freight transportation in Austria, measured in tonne-kilometers, increased faster in the last decades than the gross domestic product. The further development of transport demand can be shaped by a number of economic and social conditions. Emissions can be reduced by optimizing the logistics and strengthening the CO_2 efficiency of transport. A reduction in greenhouse gas emissions per tonne-kilometer can be achieved by alternative power and fuels, efficiency improvements and a shift to rail transportation (see Volume 3, Chapter 3).

The industry sector is the largest emitter of greenhouse gases in Austria. In 2010, the share of the manufacturing sector's contribution to the total Austrian energy-consumption as well as to greenhouse gas emissions was almost 30 %, in both cases. Emission reductions in the extent of about 50 % or more cannot be achieved within the sector through continuous, gradual improvements and application of the relevant state of the art of technology. Rather, the development of climate-friendly new procedures is necessary (radical new technologies and products with a drastic reduction of energy consumption), or the necessary implementation of procedures for the storage of the greenhouse gas emissions (carbon capture

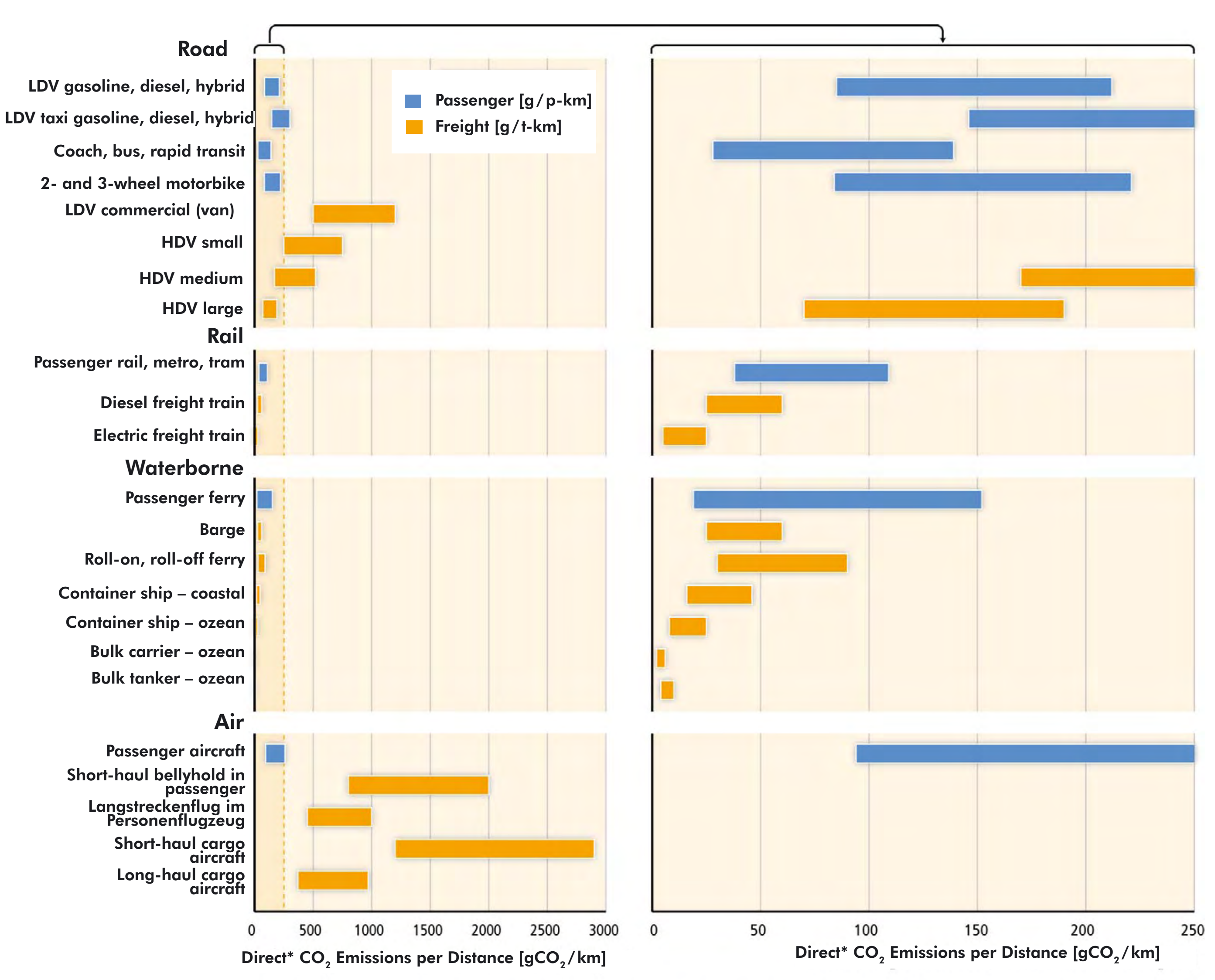


Figure 7 A comparison of characteristic CO_2 emissions per passenger-kilometer and ton-kilometer for different transport modes that use fossil energy and thermal electricity generation in case of electric railways. Source: IPCC (2014)

and storage, for example as in the EU scenarios for Energy Roadmap 2050) (very likely, see Volume 3, Chapter 5).

Tourism

Winter tourism will come under pressure due to the steady rise in temperature. Compared to destinations where natural snow is plentiful, many Austrian ski areas are threatened by the increasing costs of snowmaking (very likely, see Volume 3, Chapter 4).

Future adaptation possibilities with artificial snowmaking are limited. Although currently 67 % of the slope surfaces are equipped with snowmaking machines, the use of these is limited by the rising temperatures and the (limited) availability of water (probably, see Volume 3, Chapter 4). The promotion of the development of artificial snow by the public sector could therefore lead to maladaptation and counterproductive lock-in effects.

Tourism could benefit in Austria due to the future very high temperatures expected in summer, in the Mediterra-

nean (very likely). However, even with equally good turnout and capacity utilization in the summer, the value added lost in winter cannot be regained with an equal gain in visitor numbers in summer (see Volume 3, Chapter 4).

Losses in tourism in rural areas have high regional economic follow-up costs, since the loss of jobs often cannot be compensated by other industries. In peripheral rural areas, which already face major challenges due to the demographic change and the increasing wave of urbanization, this can lead to further resettlement (see Volume 3, Chapter 1; Volume 3, Chapter 4).

Urban tourism may experience set-backs in midsummer due to hot days and tropical nights (very likely). Displacements of the stream of tourists in different seasons and regions are possible and currently already observable (see Volume 3, Chapter 4).

Successful pioneers in sustainable tourism are showing ways to reduce greenhouse gases in this sector. In Austria there are flagship projects at all levels – individuals, municipalities and regions – and in different areas, such as hotels, mobility, and lucrative offers for tourists. Due to the long-term investment in infrastructure for tourism, lock-in effects are particularly vulnerable (see Volume 3, Chapter 4).

Infrastructure

Energy use for heating and cooling buildings and their GHG emissions can be significantly reduced (high agreement, see Volume 3, Chapter 5). A part of this potential can be realized in a cost-effective manner. To further reduce the energy demand of existing buildings, high-quality thermal renovation is necessary. For energy supply, mainly alternative energy sources, such as solar thermal or photovoltaic are to be used for the reduction of greenhouse gas emissions. Heat pumps can only be used in the context of an integrated approach which ensures low CO_2 power generation, thereby contributing to climate protection. Biomass will also be important in the medium term. District heating and cooling will become less important in the long term due to reduced demand. A significant contribution to future greenhouse gas neutrality in buildings can also be provided by building construction standards, which the (almost) zero-energy and plus-energy houses promote. These are foreseen to occur across the EU after 2020. Given the large number of innovative pilot projects, Austria could assume a leadership role in this area also before. Targeted construction standards and renovation measures could significantly reduce the future cooling loads. Specific zonal planning and building regulations can ensure denser designs with higher energy efficiency, especially also beyond the inner urban settlement areas (see Volume 3, Chapter 5).

Forward planning of infrastructure with a long service life under changing conditions can avoid poor investments. Against the background of continuously changing post-fossil energy supply conditions, infrastructure projects in urban locations, in transport and energy supplies should be reviewed to ensure their emission-reducing impacts as well as their resilience to climate change. The structure of urban developments can be designed so that transport and energy infrastructures are coordinated and built (and used) efficiently with low resource consumptions (see Volume 3, Chapter 5).

A decentralized energy supply system with renewable energy requires new infrastructure. In addition to novel renewables with stand-alone solutions (e. g. off-grid photovoltaics) there are also new options for integrating these onto the network. Local distribution networks for locally produced biogas as well as networks for exploiting local, mostly industrial, waste heat (see Volume 3, Chapter 1; Volume 3, Chapter 3) require special structures and control. „Smart Grids“ and „Smart Meters“ enable locally produced energy (which is fed into the grid, e. g. from co- and poly-generation or private photovoltaic systems) to contribute to improved energy efficiency and are therefore discussed as elements of a future energy system (see Volume 3, Chapter 5). However, there are concerns of ensuring network security as well as data protection and privacy protection; these issues are not yet sufficiently defined or regulated by law.

Extreme events can increasingly impair energy and transport infrastructures. Longer duration and more intense heat waves are problematic (very likely), more intense rainfall and resulting landslides and floods (probably), storms (possible) and increased wet-snow loads (possible, see Volume 1, Chapter 3; Volume 1, Chapter 4; Volume 1, Chapter 5; Volume 2, Chapter 4) pose potential risks for infrastructure related to settlement, transportation, energy and communications. If an increase in climate damages and costs are to be avoided, the construction and expansion of urban areas and infrastructure in areas (regions) that are already affected by natural hazards should be avoided. Moreover, when designating hazard zones, the future development in the context of climate change should be taken as a precautionary measure. Existing facilities can provide increased protection through a range of adaptation measures, such as the creation of increased retention areas against flooding.

The diverse impacts of climate change on water resources require extensive and integrative adaptation measures. Both high- and low-water events in Austrian rivers can nega-

tively impact several sectors, from the shipping industry, the provision of industrial and cooling water, to the drinking water supply. The drinking water supply can contribute to adaptation measures through the networking of smaller supply units as well as the creation of a reserve capacity for source water (high agreement, robust evidence, see Volume 3, Chapter 2).

Adaptation measures to climate change can have positive ramifications in other areas. The objectives of flood protection and biodiversity conservation can be combined through the protection and expansion of retention areas, such as floodplains (high agreement, much evidence). The increase in the proportion of soil organic matter leads to an increase in the soil water storage capacity (high agreement, robust evidence, see Volume 2, Chapter 6) and thus contributes to both flood protection and carbon sequestration, and therefore to climate protection (see Volume 3, Chapter 2).

Health and Society

Climate change may cause directly- or indirectly- related problems for human health. Heat waves can lead to cardiovascular problems, especially in older people, but also in infants or the chronically ill. There exists a regional-dependent temperature at which the death rate is determined to be the lowest; beyond this temperature the mortality increases by 1–6 % for every 1 °C increase in temperature (very likely, high confidence, see Volume 2, Chapter 6; Volume 3, Chapter 4). In particular, older people and young children have shown a significant increase in the risk of death above this optimum temperature. Injuries and illnesses that are associated with extreme events (e. g. floods and landslides) and allergies triggered by plants that were previously only indigenous to Austria, such as ragweed, also add to the impacts of climate change on health.

The indirect impacts of climate change on human health remains a major challenge for the health system. In particular, pathogens that are transferred by blood-sucking insects (and ticks) play an important role, as not only the agents themselves, but also the vectors' (insects and ticks) activity and distribution are dependent on climatic conditions. Newly introduced pathogens (viruses, bacteria and parasites, but also allergenic plants and fungi such as, e. g. ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*) and the oak processionary moth (*Thaumetopoea processionea*)) and new vectors (e. g., „tiger mosquito", *Stegomyia albopicta*) can establish themselves, or existing pathogens can spread regionally (or even disappear). Such imported cases are virtually unpredictable and the opportunities to take counter-measures are low (likely, medium confidence, see Volume 2, Chapter 6).

Health-related adaptations affect a myriad of changes to individual behavior of either a majority of the population or by members of certain risk groups (likely, medium agreement, see Volume 3, Chapter 4). Several measures of adaptation and mitigation that are not primarily aimed at improving human health may have significant indirect health-related benefits, such as switching from a car to a bike (likely, medium agreement, see Volume 3, Chapter 4).

The health sector is both an agent and a victim of climate change. The infrastructure related to the health sector requires both mitigation and adaptation measures. Effective mitigation measures could include encouraging the mobility of employees and patients as well as in the procurement of used and recycled products (very likely, high agreement, see Volume 3, Chapter 4). For specific adaptation to longer-term changes there is a lack of medical and climate research, however some measures can be taken now – such as in preparing for heat waves.

Vulnerable groups generally are more highly exposed to the impacts of climate change. Usually the confluence of several factors (low income, low education level, low social capital, precarious working and living conditions, unemployment, limited possibilities to take action) make the less privileged population groups more vulnerable to climate change impacts. The various social groups are affected differently by a changing climate, thus the options to adapt are also dissimilar and are also influenced by differing climate policy measures (such as higher taxes and fees on energy) (likely, high agreement, see Volume 2, Chapter 6)

Climate change adaptation and mitigation lead to increased competition for resource space. This mainly affects natural and agricultural land uses. Areas for implementing renewable energy sources, or retention areas and levees to reduce flood risks are often privileged at the expense of agricultural land. Increasing threats of natural hazards to residential areas may lead to more resettlements in the long term (high confidence, see Volume 2, Chapter 2; Volume 2, Chapter 5). In order to facilitate the adaptation of endangered species to climate change by allowing them to migrate to more suitable locations and in order to better preserve biodiversity, conservation areas must be drawn up and networked with corridors (high confidence, see Volume 3, Chapter 2). There is no regional planning strategy for Austria that can provide necessary guidelines for relevant decisions (see Volume 3, Chapter 6).

Transformation

Although in all sectors significant emission reduction potentials exist, the expected Austrian contribution towards achieving the global 2 °C target cannot be achieved with sector-based, mostly technology-oriented, measures. Meeting the 2 °C target requires more than incrementally improved production technologies, greener consumer goods and a policy that (marginal) increases efficiency to be implemented in Austria. A transformation is required concerning the interaction of the economy, society and the environment, which is supported by behavioral changes of individuals, however these changes also have to originate from the individuals. If the risk of unwanted, irreversible change should not increase, the transformation needs to be introduced and implemented rapidly (see Volume 3, Chapter 6).

A transformation of Austria into a low-carbon society requires partially radical structural and technical renovations, social and technological innovation and participatory planning processes (medium agreement, medium evidence, see Volume 3, Chapter 6). This implies experimentation and experiential learning, the willingness to take risks and to accept that some innovations will fail. Renewal from the root will be necessary, also with regards to the goods and services that are produced by the Austrian economy, and large-scale investment programs. In the assessment of new technologies and social developments an orientation along a variety of criteria is required (multi-criteria approach) as well, an integrative socio-ecologically oriented decision-making is needed instead of short-term, narrowly defined cost-benefit calculations. To be of best effectiveness, national action should be agreed upon internationally, both with the surrounding nations as well as with the global community, and particularly in partnership with developing countries (see Volume 3, Chapter 6).

In Austria, a socio-ecological transformation conducive to changes in people's belief-systems can be noticed. Individual pioneers of change are already implementing these ideas with climate-friendly action and business models (e. g. energy service companies in real estate, climate-friendly mobility, or local supply) and transforming municipalities and regions (high agreement, robust evidence). At the political level, climate-friendly transformation approaches can also be identified. If Austria wants to contribute to the achievement of the global 2 °C target and help shape a future climate-friendly development at a European level and internationally, such initiatives need to be reinforced and supported by accompanying policy measures that create a reliable regulatory landscape (high agreement, medium evidence, see Volume 3, Chapter 6).

Policy initiatives in climate mitigation and adaptation are necessary at all levels in Austria if the above objectives are to be achieved: at the federal level, at that of provinces and that of local communities. Within the federal Austrian structure the competences are split, such that only a common and mutually adjusted approach across those levels can ensure highest effectiveness and achievement of objectives (high agreement; strong evidence). For an effective implementation of the – for an achievement necessarily – substantial transformation a package drawing from the broad spectrum of instruments appears to be the only appropriate one (high agreement, medium evidence).

Figure Credits

Figure 1 Issued for the AAR14 adapted from: IPCC, 2013: In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor,S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (Eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.; IPCC, 2000: Special Report on Emissions Scenarios [Nebojsa Nakicenovic and Rob Swart (Eds.)]. Cambridge University Press, UK.; GEA, 2012: Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.

Figure 2 Issued for the AAR14 adapted from: Auer, I., Böhm, R., Jurkovic, A., Lipa, W., Orlik, A., Potzmann, R., Schöner, W., Ungersböck, M., Matulla, C., Briffa, K., Jones, P., Efthymiadis, D., Brunetti, M., Nanni, T., Maugeri, M., Mercalli, L., Mestre, O., Moisselin, J.-M., Begert, M., Müller-Westermeier, G., Kveton, V., Bochnicek, O., Stastny, P., Lapin, M., Szalai, S., Szentimrey, T., Cegnar, T., Dolinar, M., Gajic-Capka, M., Zaninovic, K., Majstorovic, Z., Nieplova, E., 2007. HISTALP – historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region. International Journal of Climatology 27, 17–46. doi:10.1002/joc.1377; ENSEMBLES project: Funded by the European Commission's 6th Framework Programme through contract GOCE-CT-2003-505539; reclip:century: Funded by the Austrian Climate Research Program (ACRP), Project number A760437

Figure 3 Muñoz, P., Steininger, K.W., 2010: Austria's CO_2 responsibility and the carbon content of its international trade. Ecological Economics 69, 2003–2019. doi:10.1016/j.ecolecon.2010.05.017

Figure 4 Issued for the AAR14. Source: ZAMG

Figure 5 Anderl M., Freudenschuß A., Friedrich A., et al., 2012: Austria's national inventory report 2012. Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and under the Kyoto Protocol. REP-0381, Wien. ISBN: 978-3-99004-184-0

Figure 6 Schleicher, St., 2014: Tracing the decline of EU GHG emissions. Impacts of structural changes of the energy system and economic activity. Policy Brief. Wegener Center for Climate and Global Change, Graz. Basierend auf Daten des statistischen Amtes der Europäischen Union (Eurostat)

Figure 7 ADEME, 2007; US DoT, 2010; Der Boer et al., 2011; NTM, 2012; WBCSD, 2012, In Sims R., R. Schaeffer, F. Creutzig, X. Cruz-Núñez, M. D'Agosto, D. Dimitriu, M.J. Figueroa Meza, L. Fulton, S. Kobayashi, O. Lah, A. McKinnon, P. Newman, M. Ouyang, J.J. Schauer, D. Sperling, and G. Tiwari, 2014: Transport. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (Eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014

Synthese

Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014

Synthese

Koordinierende LeitautorInnen der Synthese

Helga Kromp-Kolb
Nebojsa Nakicenovic
Rupert Seidl
Karl Steininger

LeitautorInnen der Synthese

Bodo Ahrens, Ingeborg Auer, Andreas Baumgarten, Birgit Bednar-Friedl, Josef Eitzinger, Ulrich Foelsche, Herbert Formayer, Clemens Geitner, Thomas Glade, Andreas Gobiet, Georg Grabherr, Reinhard Haas, Helmut Haberl, Leopold Haimberger, Regina Hitzenberger, Martin König, Angela Köppl, Manfred Lexer, Wolfgang Loibl, Romain Molitor, Hanns Moshammer, Hans-Peter Nachtnebel, Franz Prettenthaler, Wolfgang Rabitsch, Klaus Radunsky, Jürgen Schneider, Hans Schnitzer, Wolfgang Schöner, Niels Schulz, Petra Seibert, Sigrid Stagl, Robert Steiger, Johann Stötter, Wolfgang Streicher, Wilfried Winiwarter.

Zitierweise:

Kromp-Kolb, H., N. Nakicenovic, R. Seidl, K. Steininger, B. Ahrens, I. Auer, A. Baumgarten, B. Bednar-Friedl, J. Eitzinger, U. Foelsche, H. Formayer, C. Geitner, T. Glade, A. Gobiet, G. Grabherr, R. Haas, H. Haberl, L. Haimberger, R. Hitzenberger, M. König, A. Köppl, M. Lexer, W. Loibl, R. Molitor, H. Moshammer, H-P. Nachtnebel, F. Prettenthaler, W. Rabitsch, K. Radunsky, L. Schneider, H. Schnitzer, W. Schöner, N. Schulz, P. Seibert, S. Stagl, R. Steiger, H. Stötter, W. Streicher, W. Winiwarter (2014): Synthese. In: *Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC)*, Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich.

Inhalt

S.0 Einleitung
S.0 Introduction

S.0.1 Motivation
S.0.1 Motivation

Der Österreichische Sachstandsbericht Klimawandel 2014 – AAR14 – (Austrian Assessment Report, 2014) versteht sich als nationale Ergänzung zum periodisch erstellten globalen Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Während die IPCC-Berichte sich mit der globalen und regionalen Ebene beschäftigen, befasst sich der AAR14 mit der Situation in Österreich. Die zum Thema Klimawandel forschenden österreichischen Wissenschafterinnen und Wissenschafter haben in einem dreijährigen Prozess, der sich an jenem der IPCC-Assessment Reports orientierte, den vorliegenden Sachstandsbericht zum Klimawandel in Österreich erstellt. Mehr als 200 Wissenschafterinnen und Wissenschafter stellen gemeinsam dar, was über den Klimawandel in Österreich, seine Folgen, Minderungs- und Anpassungsmaßnahmen sowie zugehörige politische, wirtschaftliche und gesellschaftliche Fragen bekannt ist. Der AAR14 zeichnet ein kohärentes und konsistentes Bild der bisherig beobachteten Klimaveränderungen, ihrer Auswirkungen auf Umwelt und Gesellschaft, möglicher Zukunftsentwicklungen sowie Handlungsoptionen im Bereich Anpassung und Minderung in Österreich, unter Berücksichtigung der naturräumlichen, gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Eigenheiten des Landes. Damit wird benötigtes Wissen zu den regionalen Ausprägungen des globalen Klimawandels verfügbar gemacht. Der Bericht weist aber auch auf Verständnis- und Wissenslücken hin. Wie die IPCC-Berichte beruht der AAR14 auf bereits publizierten Beiträgen und will entscheidungsrelevante Information liefern, ohne Entscheidungsempfehlungen abzugeben.

Das Austrian Climate Research Program (ACRP) des Klima- und Energiefonds (KLIEN) hat die Arbeit durch Finanzierung koordinativer Tätigkeiten und Sachleistungen ermöglicht, die umfangreiche inhaltliche Arbeit wurde jedoch von den Forscherinnen und Forschern unentgeltlich geleistet.

In der vorliegenden Synthese sind in drei Abschnitten die wesentlichen Aussagen wiedergegeben, die jeweils auf der Basis von Beiträgen der Koordinierenden LeitautorInnen der einzelnen Kapitel des AAR14 zusammengestellt bzw. verfasst wurden. Die Abschnitte entsprechen den drei Bänden des vollständigen Werkes:

- **Band 1** Klimawandel in Österreich: Einflussfaktoren und Ausprägungen (Redaktion: Helga Kromp-Kolb)

Dieser Band beschreibt die naturwissenschaftlichen Grundlagen des Klimawandels und vor allem seiner vergangenen und zukünfitgen Ausprägungen in Österreich.

- **Band 2** Auswirkungen auf Umwelt und Gesellschaft (Redaktion: Rupert Seidl)

Dieser Band befasst sich mit den Auswirkungen des Klimawandels auf die Hydro-, Bio-, Pedo-, und Reliefspäre, sowie auf Mensch, Wirtschaft und Gesellschaft (Anthroposphäre).

- **Band 3** Klimawandel in Österreich: Vermeidung und Anpassung (Redaktion: Nebojsa Nakicenovic und Karl Steininger)

Dieser Band stellt Maßnahmenoptionen vor, sowohl zur Minderung von THG-Emissionen als auch zur Anpassung an den Klimawandel. Mögliche Transformationspfade hin zu einer klimafreundlicheren Gesellschaft und Wirtschaft werden aufgezeigt.

Hinweise im Text der Synthese auf einzelne Kapitel erfolgen durch Angabe des Bandes und des Kapitels (Bspw. Band 1, Kapitel 3). Dort finden sich auch die Hinweise auf die Originalliteratur.

S.0.2 Umgang mit Unsicherheiten; Sicherheits- und Vorsorgeprinzip
S.0.2 Handeling Uncertainties; Safety and Precautionary Principle

Jede Erkenntnis, auch wissenschaftliche, ist mit Unsicherheiten behaftet. In der öffentlichen Diskussion um den Klimawandel wurde und wird Unsicherheit oft als Begründung für das Aufschieben von Entscheidungen und Handeln herangezogen. Aus Sicht der Wissenschaft gilt es mit Unsicherheit adäquat umzugehen. Der vorliegende Bericht zeigt, dass – trotz der Unsicherheiten – auf Basis des vorhandenen Wissens adäquate Entscheidungen getroffen werden können.

Die Unsicherheit hinsichtlich der wissenschaftlichen Zuverlässigkeit der Theorie des anthropogen bedingten Klimawandels (kurz: Klimawandeltheorie) wird von Medien und populärwissenschaftlichen Büchern und Filmen genährt, die ein breites Spektrum an alternativen Interpretationen anbieten. Erkenntnistheoretisch betrachtet ist ein strenger Beweis der Klimawandeltheorie grundsätzlich nicht möglich (Band 1, Kapitel 5), außerdem ist die Zukunft prinzipiell nicht vorhersehbar. Die Theorie des vom Menschen verursachten Klima-

wandels ist jedoch durch Modellexperimente und empirische Studien gut belegt und darüber hinaus seit über 40 Jahren wissenschaftlicher Überprüfung unterworfen. Sie ist damit allen anderen bisher vorgebrachten Theorien und Hypothesen zum Klimawandel deutlich überlegen und solange keine den Kern der Theorie infragestellenden neuen Erkenntnisse oder Belege sichtbar werden, ist es angebracht, diese Theorie gesellschaftlichen, politischen und wirtschaftlichen Entscheidungen zugrunde zu legen.

Innerhalb der Klimawandeltheorie sind die Aussagen unterschiedlich gut abgesichert. So sind etwa die meisten Aussagen über zukünftige Temperaturänderungen robuster als über zukünftige Niederschlagsänderungen. Unsicherheiten können aus vielen Gründen entstehen, wie z. B. aus Datenmangel, mangelndem Verständnis für die Prozesse oder Fehlen einer allgemein anerkannten Erklärung für Beobachtungen oder Modellergebnisse. Innerhalb der Klimawandeltheorie sind die Aussagen unterschiedlich gut abgesichert.

Das IPCC hat ein System entwickelt, Unsicherheiten mittels dreier verschiedener Ansätze zum Ausdruck zu bringen. Die Auswahl unter- und innerhalb dieser Ansätze hängt sowohl vom Wesen der verfügbaren Daten ab als auch von der fachkundigen Beurteilung der Richtigkeit und Vollständigkeit des aktuellen wissenschaftlichen Verständnisses durch die AutorInnen. Bei einer **qualitativen** Abschätzung wird Unsicherheit auf einer zweidimensionale Skala dadurch beschrieben, dass eine relative Einschätzung gegeben wird: einerseits für die Menge und Qualität an Beweisen (d. h. Informationen aus Theorie, Beobachtungen oder Modellen, die angeben, ob eine Annahme oder Behauptung wahr oder gültig ist) und andererseits für das Ausmaß an Übereinstimmung in der Literatur. Dieser Ansatz wird mit den selbsterklärenden Begriffen starke, mittlere und schwache Beweislage hohe, mittlere, schwache Übereinstimmung sowie angewendet. Die gemeinsame Beurteilung in beiden diesen Dimensionen wird durch Vertrauensangaben auf einer fünf-stufigen Skala von „sehr hohes Vertrauen“ bis „sehr geringes Vertrauen“ beschrieben. Mittels fachkundiger Beurteilung der Richtigkeit zugrundeliegender Daten, Modelle oder Analysen **quantitativ** besser fassbare Unsicherheiten werden angegeben durch Wahrscheinlichkeitsangaben in acht Stufen von „praktisch sicher“ bis „außergewöhnlich unwahrscheinlich“ bei Bewertungen eines gut definierten Ergebnisses, das eingetreten ist oder zukünftig eintreten wird. Sie können aus quantitativen Analysen oder Expertenmeinungen abgeleitet werden. Genauere Angaben dazu finden sich in der Einleitung des AAR14. Gilt eine demgemäß vorgenommene Beurteilung für einen ganzen Absatz befindet sie sich am Ende desselben, sonst steht sie bei der jeweiligen Aussage.

Da der Bericht nicht nur vergangene Veränderungen darstellt, sondern auch mögliche zukünftige Entwicklungen, ist auch der Unsicherheit Rechnung zu tragen, die daraus entsteht, dass menschliches Handeln die Zukunft beeinflusst. Dies wird in der Klima- und Klimafolgenforschung typischer Weise durch die Betrachtung verschiedener Szenarien bewerkstelligt: Es werden mehrere mögliche Zukunftsentwicklungen dargestellt, ohne eine eigentliche Prognose zu erstellen.

Bei der Szenarienauswahl beschränkt man sich nicht auf die wahrscheinlichsten Entwicklungen, denn die Klimafrage ist keine rein akademische, sondern auch eine ethische Frage. Nicht alle wahrscheinlichen oder möglichen Konsequenzen des Klimawandels sind aus ethischer Sicht gleichermaßen wichtig (Band 1, Kapitel 5). Insbesondere sind aus ethischer Sicht jene Konsequenzen zu betrachten, die das Risiko der Verletzung grundlegender Rechte von Menschen bergen, wie etwa das Recht auf Überleben, Gesundheit oder Autonomie. Weitgehend unumstritten ist, dass auch zukünftig lebende Menschen Anspruchsrechte haben, die heute lebende Menschen respektieren müssen. Seit dem „Brundtland-Bericht“ (1987) findet sich dies als „nachhaltige Entwicklung“ auf internationaler Ebene immer wieder als Handlungsprinzip und ist daher als internationaler ethischer Grundkonsens aufzufassen. Eine Klimapolitik, die viele Menschen vermeidbar dem Risiko der Verletzung ihrer grundlegenden Rechte aussetzt, ist demnach ethisch unzulässig.

Zur Orientierung können drei Prinzipien der Umweltethik herangezogen werden, die sich in unterschiedlicher Form auch in den Rechtskörpern vieler Staaten wiederfinden: Das Sicherheitsprinzip, das Vorsorgeprinzip und das Verursacherprinzip. Das Sicherheitsprinzip verlangt, im Zweifel für mögliche negative Umweltauswirkungen deren obere Grenze (das „worst case scenario“) anzunehmen. Ein über jeden Zweifel erhabener wissenschaftlicher Nachweis negativer Folgen des Klimawandels ist demnach zum Setzen von Klimaschutzmaßnahmen nicht erforderlich, es genügt vielmehr ein plausibel begründeter Verdacht. Daher sind Zweifel an der anthropogenen Beeinflussung des Klimas nicht als Rechtfertigung von „business as usual“ zu akzeptieren. Für die Klimawissenschaft bedeutet dies, dass sie jedenfalls die volle Bandbreite möglicher Auswirkungen darstellen muss, einschließlich eher unwahrscheinlicher aber möglicher „best case“ und „worst case“ Szenarien, um der Gesellschaft informierte Entscheidungen zu ermöglichen.

S.0.3 Danksagung
S.0.3 Acknowledgements

An der Erstellung des AAR14 haben über 250 Personen mitgewirkt, die im vollständigen Bericht genannt und gewürdigt werden. Sie haben die Basis für die vorliegende Synthese geliefert. An dieser Stelle kann nur insgesamt nochmals allen beitragenden AutorInnen, den LeitautorInnen und Koordinierenden AutorInnen, den Co-Chairs, den ReviewerInnen und den Review EditorInnen, den Mitgliedern des Qualitätsmanagements sowie des Scientific Advisory Board, der Projektmanagerin, dem Sekretariat, den LektorInnen und den LayouterInnen sehr herzlich gedankt werden. Dank gebührt auch allen Institutionen, die durch ihre finanziellen oder in-kind Beiträge diese Arbeit ermöglicht haben, sowie dem Klima- und Energiefonds und dem Fonds zur Förderung der Wissenschaftlichen Forschung für die finanzielle Unterstützung.

S.1 Klimawandel in Österreich: Einflussfaktoren und Ausprägungen
S.1 Climate Change in Austria: Influencing Factors and Characteristics

S.1.1 Das globale Klimasystem und Ursachen des Klimawandels
S.1.1 The global climate system and causes of climate change

Mit Fortschreiten der Industrialisierung sind weltweit deutliche Veränderungen des Klimas zu beobachten. Die Temperatur ist beispielsweise in der Periode seit 1880 im globalen Mittel um fast 1 °C gestiegen. Das Verständnis für die Ursachen dieser Veränderungen ist Voraussetzung für die Abschätzung möglicher zukünftiger Veränderungen.

Das Klimasystem kann als von außen angetriebenes, dynamisches System betrachtet werden, dessen Zustand sich auf Zeitskalen von Jahren bis zu geologischen Zeiträumen ständig „wandelt". Beeinflusst wird das Klima von Subsystemen wie zum Beispiel: der Atmo-, Hydro- oder Biosphäre.

Diese Sphären speichern und tauschen Energie, Wasser, Kohlenstoff und Spurenstoffe aus (Abbildung S. 1.1), Vorgänge, die vielfach als Kreisläufe darstellbar sind. Die Energie zur Aufrechterhaltung aller (Klima-)Prozesse auf Erden liefert die Sonne. Die Sonnenenergie dringt zunächst als solare Strahlung ins Klimasystem ein. Ein großer Teil der von der Erdoberfläche absorbierten Sonnenstrahlung wird als terrestrische Strahlung wieder in die Atmosphäre abgestrahlt, dort teilweise absorbiert und wieder zurückgestrahlt. Das ist die Manifestation des Treibhauseffektes im Klimasystem. Der Rest wird als terrestrische Strahlung in den Weltraum abgestrahlt. Ein verhältnismäßig geringer Teil der auf der Erde absorbierten Energie wird von der Biosphäre aufgenommen, z. B. um Photosynthese zu betreiben. Solare Einstrahlung (Wellenlänge 0,3–3 µm) und terrestrische Ausstrahlung (3–100 µm) halten sich im Mittel über einige Jahre die Waage, wenn sich das Klimasystem im globalen Gleichgewicht befindet.

Wird die terrestrische Ausstrahlung abgeschwächt, z. B. durch Zunahme von strahlungsaktiven Spurengasen wie Kohlendioxid (CO_2), Lachgas, (N_2O), Methan (CH_4), Ozon (O_3), Fluorchlorkohlenwasserstoffe, Schwefelhexafluorid (SF_6) oder Wasserdampf (H_2O), kann das zu einer Nettoenergiezufuhr ins Klimasystem führen.

Neben dem Treibhauseffekt gibt es drei wesentliche Größen, die den Energieaustausch der Erde mit dem Weltraum und somit auch den Strahlungsantrieb und die mittlere Oberflächentemperatur der Erde beeinflussen können:

- Der Strahlungsfluss der Sonne, der den Planeten Erde erreicht. Er unterliegt natürlichen Schwankungen, die aber in den letzten 400 Jahren maximal 0,5 W / m^2 ausgemacht haben, sehr wenig im Vergleich zum mittleren Wert von 1 361 W / m^2.
- Schwankungen der Erdbahn-Parameter auf Zeitskalen von mehreren Hunderten bis mehreren Hunderttausenden von Jahren (Milankovic-Theorie).
- Die planetare Albedo, das ist der Anteil der einfallenden Sonnenstrahlung, der von der Erde und ihrer Atmosphäre ohne Absorption reflektiert wird. Die Albedo wird bestimmt durch die Wolken, Ausmaß und Verteilung von Schnee und Eis, die Aerosolpartikel in der Atmosphäre und Art der Landbedeckung bzw. Landnutzung. Änderungen der Albedo in der Größenordnung eines Prozentpunktes haben bereits erheblichen Einfluss auf die Strahlungsbilanz.

Neben dem Energiehaushalt spielt der Wasserhaushalt eine zentrale Rolle. Wasserdampf ist das wichtigste THG, doch sind Antropogene Emissionen von Wasserdampf, im Vergleich zu natürlichem Verdunstung vernachlässigbar. Der mit zunehmender Temperatur steigende Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre führt wegen der verstärkten Gegenstrahlung zu

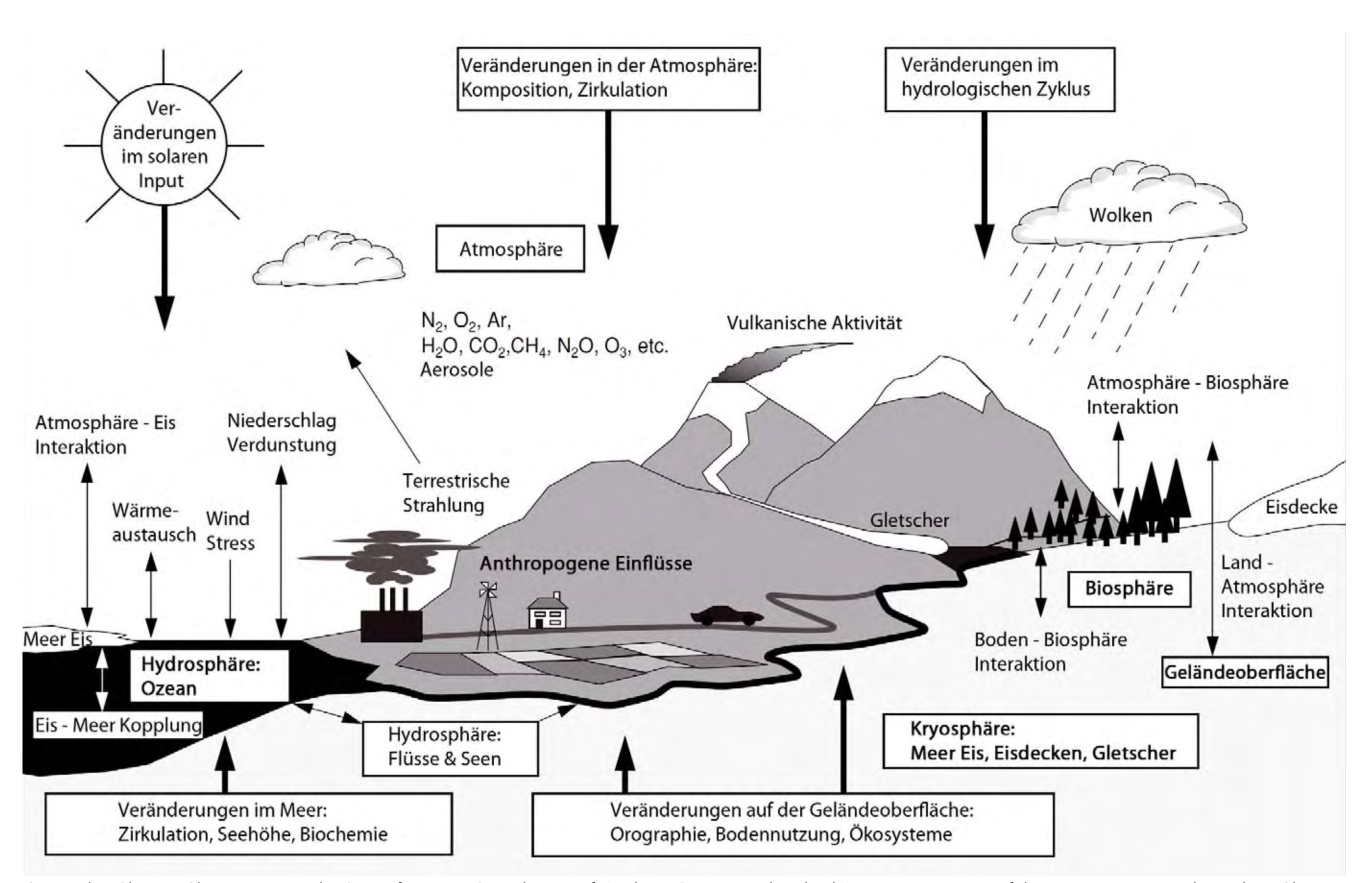


Abbildung S.1.1. Darstellung der Klimasubsysteme (Rechtecke, fett), deren Wechselwirkungen (dünne Pfeile, normaler Text) und einige Aspekte, die sich im Lauf der Jahre ändern (dicke Pfeile). Für die Atmosphäre sind die für den Strahlungshaushalt hauptsächlich relevanten Spurengase und Aerosole aufgezählt. Quelle: Houghton et al. (2001)

Figure S.1.1. Graphical overview over climate subsystems (boxes, bold font), their exchanges (thin arrows, normal font) and some aspects which change (thick arrows). The most relevant trace gases and aerosols are mentioned. Source: Houghton et al. (2001)

einer positiven Rückkoppelung und verstärkt somit die durch langlebigeres THG verursachte Erwärmung. Wegen seiner kurzen Verweildauer in der Troposphäre und der geringe Bedeutung der direkten Emissionen, scheint er in den THG-Bilanzen oft nicht auf.

Zur Erklärung des beobachteten Anstiegs von THG in der Atmosphäre ist die Betrachtung biogeochemischer Kreisläufe notwendig, insbesondere des Kohlenstoffhaushaltes. Er beinhaltet Prozesse wie Photosynthese, Atmung, Speicherung und Respiration im Ozean sowie anthropogene Aktivitäten. Anthropogene Quellen verursachen steigenden atmosphärischen CO_2-Gehalt; dadurch werden auch die natürlichen Senken aktiver, insbesondere tritt vermehrte Photosynthese (mehr Biomasseproduktion) sowie vermehrte Lösung von CO_2 in den Ozeanen (Versauerung der Ozeane) auf.

Der Einfluss des Menschen auf das Klimasystem ist im Detail sehr komplex, jedoch erklären einige wenige Aktivitäten den Großteil der beobachteten Klimaänderungen seit 1880. Dies sind:

1. Verbrennung fossiler Brennstoffe (Kohle, Erdöl, Erdgas) und daraus folgend THG-Emissionen
2. Landnutzungsänderungen (z. B. Abholzung, Aufforstung, Versiegelung) und Landwirtschaft (z. B. Abholzung, Versiegelung, Stickstoffdüngung, Humusabbau, Methanemissionen aus Reisfeldern und den Mägen von Wiederkäuern)
3. Prozessbezogene Emissionen der Industrie (beispielsweise Zement- und Kalkerzeugung, Stahlerzeugung)

Die wichtigste Quelle in den letzten 50 Jahren war die Verbrennung fossiler Energieträger, die sich in diesem Zeitraum mehr als verdreifacht hat. Mit der steigenden CO_2-Konzentration in der Atmosphäre sind auch die natürlichen CO_2-Senken stärker geworden, wobei sie aber die steigende anthropogene CO_2-Zufuhr nicht ausgleichen können. Nach den derzeit aktuellsten Abschätzungen beträgt der anthropogene CO_2-Aus-

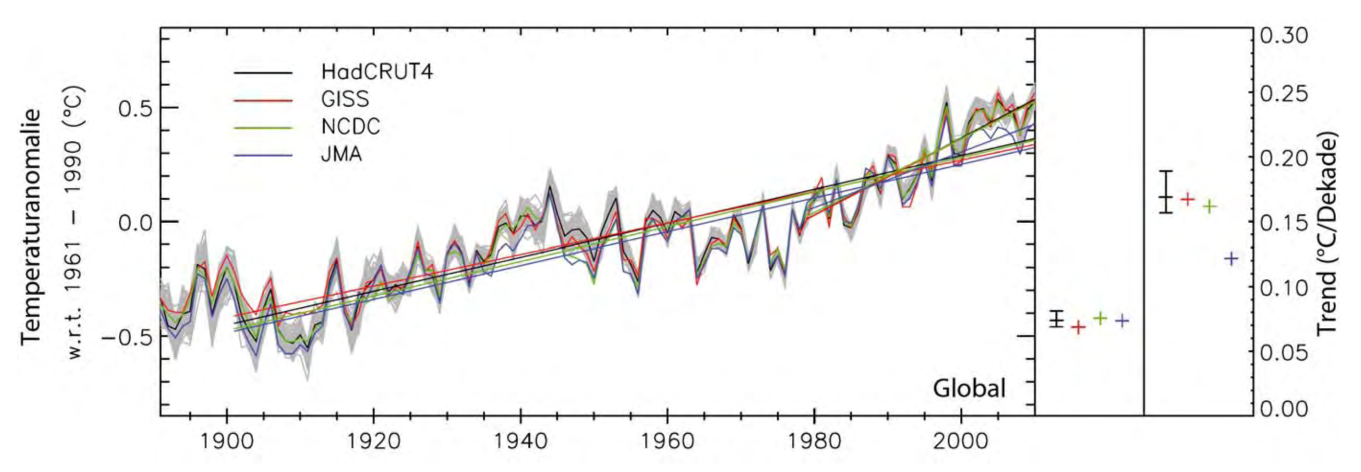


Abbildung S.1.2. Zeitreihen der Abweichung der globalen Oberflächentemperatur vom Mittel der Periode 1961 bis 1990 mit Unsicherheitsbereich, ausgewertet durch vier internationale Forschungsgruppen. Die Trends rechts sind für 1900 bis 2010 sowie 1980 bis 2010 berechnet. Sie sind in allen Fällen statistisch hoch signifikant. Quelle: Morice et al. (2012)

Figure S.1.2. Time-series of global surface temperature anomalies (reference period 1961 to 1990) with uncertainty bounds, calculated by four international research groups. Trends on the right are calculated for 1900 to 2010 and 1980 to 2010, and are statistically highly significant. Source: Morice et al. (2012)

stoß derzeit (2011) in Summe 10,4 ±1,1 Gt C / Jahr, wovon 9,5 ±0,5 Gt C / Jahr auf die Verbrennung von fossilen Treibstoffen sowie Zementproduktion und 0,9 ±0,6 Gt C / Jahr auf Landnutzungsänderungen entfallen. Davon werden nur 2,5 ±0,5 Gt C / Jahr vom Ozean bzw. 2,6 ±0,8 Gt C / Jahr von der Landbiosphäre aufgenommen werden, während 4,3 ±0,1 Gt C / Jahr in der Atmosphäre verbleiben. Dementsprechend hat der CO_2-Gehalt in der Atmosphäre ca. seit 1959 um etwa 30 % zugenommen.

Diese Zunahme ist einwandfrei messbar und ist eines der wichtigsten Fundamente für die Erkenntnis, dass der anthropogene CO_2-Ausstoß zu einer Zunahme der CO_2-Konzentration führt.

Die gesamten anthropogenen CO_2-Emissionen seit 1870 betrugen etwa 1 470 Gt CO2 (400 Gt C). Der Kohlenstoffgehalt der Atmosphäre insgesamt ist seit 1870 um 840 Gt CO_2 (230 Gt C das sind 39 % gegenüber vorindustrieller Zeit) angestiegen. Das zweitwichtigste anthropogene THG, Methan, hat seine Konzentration seit 1870 sogar mehr als verdoppelt. Der IPCC-Bericht 2013 schätzt den Beitrag aller Formen anthropogenen THGs zum Strahlungsantrieb auf 1,9 W / m² ±1 W / m².

Der derzeitige Klimawandel äußert sich vor allem in einem Anstieg der globalen Mitteltemperatur, aber auch in der Änderung einer Reihe anderer Parameter wie der Niederschlagsverteilung oder der Verschiebung von Klimazonen. Tendenziell ist eine Verschiebung der Klimazonen polwärts sowie eine Vergrößerung der Trockengebiete feststellbar. Auch die Änderungen in der Kryosphäre (alle Formen von Schnee und Eis) sind dramatisch. Das betrifft einerseits die Gletscherschmelze in den Alpen und anderen Gebirgen aber auch die Schmelze des grönländischen Inlandeises und die Abnahme des Meereises im arktischen Sommer. Die thermische Ausdehnung der Ozeane und Abschmelzen von landgebundenen Gletschern und Eisschilden bewirkt einen Anstieg der Meeresoberfläche und damit eine zunehmende Gefährdung der Küstengebiete; von 1880 bis 2009 ist der Meeresspiegel im globalen Mittel um ca. 20 cm angestiegen.

Vergangene Klimate vor der instrumentellen Periode kann man aus sogenannten Proxydaten rekonstruieren. Dies sind u. a. Fossilien oder Ablagerungen aus früheren erdgeschichtlichen Epochen. Insbesondere aus Isotopenverhältnissen in Tiefseeablagerungen, aber auch aus Eisbohrkernen, kann man auf die damals vorherrschenden Temperaturen schließen. Für das Holozän, die Zeit nach der letzten Kaltzeit, steht noch eine Reihe anderer Proxydaten, wie Jahresringe von Bäumen, Pollen und Korallen zur Verfügung, um nur einige zu nennen.

Das Klima der aktuellen etwa 2,5 Mio. Jahre andauernden erdgeschichtlichen Periode, des Quartärs, war ein Wechselspiel von langen Glazialzeiten („Kaltzeiten“) mit globalen Mitteltemperaturen bis zu 6 °C unter heutigen Werten, und kurzen Interglazialzeiten („Warmzeiten“), mit ähnlichen Temperaturen wie heute., gesteuert durch Schwankungen der Erdbahn-Parameter (Form der Erdbahn, Neigung und Orientierung der Rotationsachse der Erde). Innerhalb dieser Rahmenbedingungen leben wir derzeit in einer Warmzeit. Im Holozän

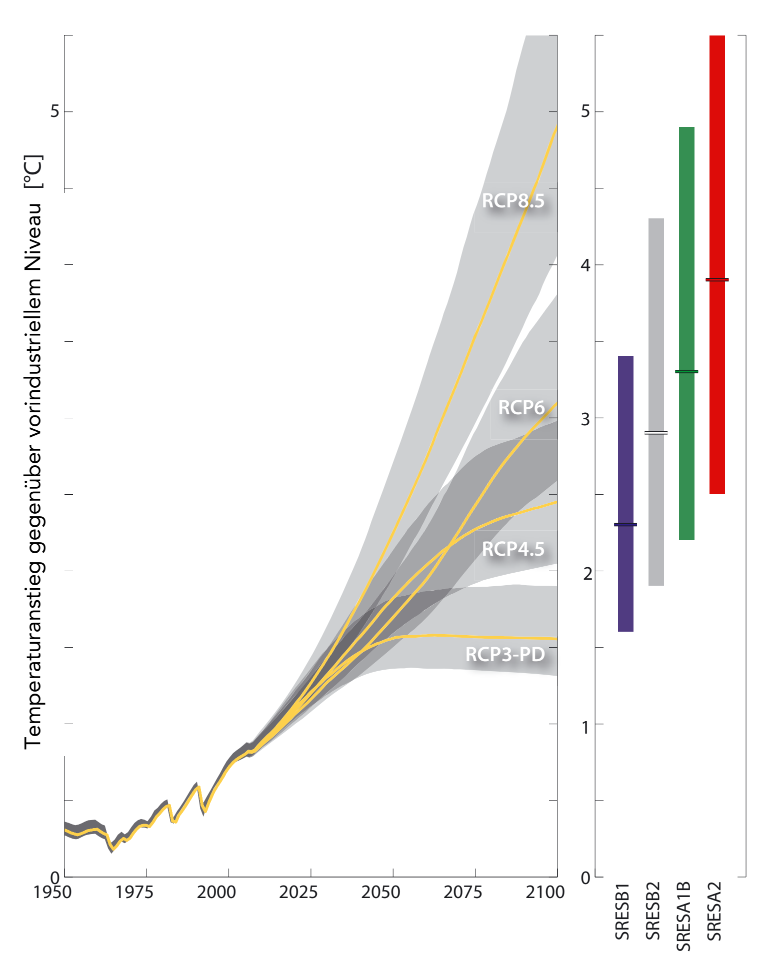


Abbildung S.1.3. Beobachtete und modellierte globale Mitteltemperatur in Bodennähe für den Zeitraum von 1850 bis 2100, angegeben als Abweichung vom Mittelwert der Periode 1980–1999, berechnet mit für vier repräsentative Konzentrationspfade (RCPs). Quelle: Rogelj et al. (2012)

Figure S.1.3. Observed and simulated global average temperatures near the surface for the period 1950–2100, shown as deviations from the mean temperature of 1980-1999, for four representative concentration pathways (RCPs). Source: Rogelj et al. (2012)

in den letzten 11 700 Jahren war das Klima relativ stabil, in den letzten 2 000 Jahren hat es erwähnenswerte warme Phasen (um 1 000 n. Chr.) und kalte Phasen (17. Jahrhundert und um 1850) gegeben.

Seit ca. 1850 steigt die Temperatur global an, wobei sich der Anstieg in den letzten Jahrzehnten sowohl nach den Proxydaten als auch nach instrumentell gewonnenen Daten tendenziell beschleunigt hat. Die Erwärmungsrate war insbesondere in den letzten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts verglichen mit den früheren Klimaschwankungen im Holozän dramatisch. Der nun beobachtete rasche Anstieg in den letzten 100 Jahren um etwa 1 °C (siehe Abbildung S.1.2) ist erdgeschichtlich nicht extrem, allerdings ist er zum ersten Mal durch anthropogene Aktivitäten verursacht und es ist erst der Beginn einer zu erwartenden noch wesentlich stärkeren Erwärmung.

Auf Basis der vorhandenen Beobachtungen, dem Modell massiger Rekonstruktion der Vergangenheit (Reanalysen) und ausgeklügelten statistischen Verfahren, den sogenannten Fingerprint-Methoden sowie Klimasimulationen, kann der anthropogene Einfluss auf das derzeitige Klima ermittelt werden. Aus diesem Nachweis folgt unmittelbar, dass auch die zukünftige Klimaentwicklung maßgeblich von den weltweiten sozioökonomischen Entwicklungen beeinflusst werden wird. Dabei sind sehr verschiedene Entwicklungspfade denkbar, die von schwer vorhersagbaren Parametern wie der Bevölkerungs- und Wirtschaftsentwicklung, dem Einsatz und der Entwicklung von emissionsmindernden Technologien, Rohstoffverfügbarkeiten und politischen Entscheidungen abhängen. Damit unterliegt die zukünftige Klimaentwicklung auch menschlichen Entscheidungen.

Für den 5. IPCC-Sachstandsbericht wurden vier so genannte „Representative Concentration Pathways" (RCP, „repräsentative Konzentrationspfade") entwickelt, welche die Grundlage für Klimaprojektionen bilden. Die einzelnen Pfade geben unterschiedliche Verläufe von THG-Emissionen vor, die im Jahr 2100 zu Werten des Strahlungsantriebs in einem Bereich von 2,6 (RCP2.6) bis 8,5 W/m² (RCP8.5) führen (Band 1, Kapitel 1), die alle zur Stabilsierung des Strahlungsantriebes auf verschiedenen Niveaus und mit unterschiedlichem Zeithorizont führen.

Mit Erdsystem-Simulationsmodellen (eine Weiterentwicklung der globalen Klimamodelle) wurden auf Basis der RCP-Emissionspfade u. a. Temperatur-, Druck- und Niederschlagsänderungen berechnet. Die globale Mitteltemperatur in Bodennähe dient der allgemeinen Beschreibung der anthropogenen Erwärmung der Erdatmosphäre. Sie ist Sinnbild und zugleich wertvoller Indikator für die Klimaänderung insgesamt. Das international akkordierte politische Ziel von maximal 2 °C Erwärmung gegenüber dem vorindustriellen Temperaturniveau wird, wie Abbildung S. 1.3 zeigt, nur im ehrgeizigsten Konzentrationspfad (RCP2.6) erreicht. Die maximalen Werte des globalen Strahlungsantriebs werden im RCP2.6 vor dem Jahr 2050 erreicht, im RCP4.5 tritt eine Stabilisierung ab ca. 2080 und im RCP6.0 ab ca. 2150 ein. Dennoch kommt es auch nach diesen Zeitpunkten zu einem Temperaturanstieg, was an der Trägheit des Klimasystems und insbesondere der Ozeane liegt. Größere Unterschiede zwischen den Szenarien treten erst ab ca. Mitte des 21. Jahrhunderts auf.

Die vor dem 5. Sachstandsbericht des IPCC gebräuchlichen SRES-Szenarien liegen noch zahlreichen regionalen Klimastudien und fast allen Klimafolgenstudien zugrunde und finden sich daher vielfach in den weiteren Ausführungen. Vergleicht man den Temperaturanstieg zu Ende des Jahrhunderts, so entspricht dem extremen RCP8.5 etwa das SRES A1F1 Szenario, RCP6.0 entspricht etwa SRES B2 und RCP4.5 etwa SRES B1. Das häufig verwendete SRES A2 Szenario liegt nahe beim RCP8.5. Ein dem 2 °C Ziel entsprechendes SRES Szenario analog zu RCP2.6 war in der SRES Gruppe nicht vorgesehen. Die SRES-Szenarien hatten entsprechend den damaligen Vorgaben des IPCC keine Minderungsmaßnahmen und daher auch keine Stabilisierung vorgesehen. Das von den neuen RCPs aufgespannte Feld möglicher Entwicklungen im 21. Jahrhundert ist also breiter als jenes der SRES-Szenarien.

S.1.2 Emissionen, Senken und Konzentrationen von THG-en und Aerosolen

S.1.2 Emissions, Sinks and Concentrations of Greenhous Gases and Aerosols

Österreich setzte 2010 THG im Ausmaß von fast 81 Mt CO_2-Äq. (81 000 Gg[1] CO_2-Äq.)[2] frei, das sind etwa 0,17 % der weltweiten Emissionen[3]. Österreich liegt mit 9,7 t CO_2-Äq. / Kopf und Jahr etwas höher als der EU-Schnitt von 8,8 t CO_2-Äq. und deutlich höher als jener der Schweiz mit 6,9 t CO_2-Äq., aber deutlich niedriger als etwa die USA (18,4 t CO_2-Äq.). Entgegen der im Kyoto-Protokoll eingegangenen Verpflichtung Österreichs, die THG-Emissionen zwischen 1990 und 2010 um 13 % zu reduzieren, lagen die Emissionen 2010 – unter Berücksichtigung der Abnehmenden Kohlenstoff senken – um fast 19 % über denen von 1990 (siehe Abbildung S. 1.4)

Die Nutzung **fossiler Energieträger** verursacht den größten Teil der nationalen THG-Emissionen: insgesamt fast 63 Mt CO_2-Emissionen im Jahr 2010 (78% der gesamten THG-Emissionen des Landes). Darin entfallen – bezogen jeweils auf die gesamten THG-Emissionen Österreichs – mehr als 17 % auf energetische Umwandlung (Kraftwerke, Raffinerie, Kokerei), fast 20 % auf die energetische Verwendung in der Industrie, ca. 13 % auf Raumwärmeerzeugung (9 % in Haushalten) und der größte Teil der übrigen Emissionen (über 27 %) auf den Verkehr. CH_4 und N_2O entstehen als unerwünschte Verbrennungsprodukte, allerdings in geringem Umfang. Im Bereich Verkehr wird fast ausschließlich CO_2 emittiert, der Anteil von N_2O beträgt nur 1,2 % und von CH_4 nur weniger als 0,1 % der THG-Emissionen.

Im Jahr 2010 waren **Industrieprozesse** mit 13 % (insgesamt 11 Mt CO_2-Äq.) nach den energetischen Emissionen der wesentlichste Verursacher der österreichischen THG-Emissionen. Die diesem Bereich zugeordneten Emissionen beinhalten nur die prozessbedingten Emissionen (Prozesse in der industriellen Produktion, bei denen THG freigesetzt wird), die energetischen Emissionen werden den energetischen Umwandlungen zugerechnet (siehe vorigewr Absatz). Die Prozessemissionen gliedern sich wie folgt: Mit 5,5 Mt CO_2 (2010) umfasst die Eisen- und Stahlproduktion etwa 6,5 % der österreichischen THG-Emissionen. Die Produktion von Ammoniak aus Erdgas führt zu 540 kt CO_2. Emissionen von N_2O, das bei der Produktion von Salpetersäure als Nebenprodukt der Oxidation von Ammoniak entsteht, lagen im Jahr 2010 nur mehr bei 64 kt CO_2-Äq, da die einzige österreichische Anlage seit 2004 mit Vorrichtungen zur katalytischen Reduktion des entstehenden N_2O ausgestattet ist. Bei der Zementprodukti-

[1] 1 Gg = 10^9 g, entspricht 1 kt (Tausend Tonnen) und 1 Tg = 10^{12} g = 1 Mt (Million Tonnen)

[2] Alle Angaben über THG werden unter Berücksichtigung ihres „global warming potential" (GWP) angeführt. Das GWP gibt das globale Erwärmungspotential einer Substanz über 100 Jahre im Verhältnis zu CO_2 wieder und erlaubt so, THG in CO_2-Äquivalente umzurechnen und dann in ihrer Gesamtheit zu betrachten. Das GWP für CO_2 ist definitionsgemäß gleich 1. Hier werden gemäß IPCC (1996) und den verpflichtenden Emissionsberichten an die UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) Werte von 21 für CH_4 (d. h. 1 kg CH_4 wirkt so stark wie 21 kg CO_2), 310 für N_2O und je nach fluorierter Verbindung zwischen 140 und 23 900 verwendet.

[3] Natürliche biogeochemische Kreisläufe sind nicht berücksichtigt, da sie als konstanter Hintergrund betrachtet werden. Alle angegebenen Emissionszahlen beziehen sich auf das Jahr 2010.

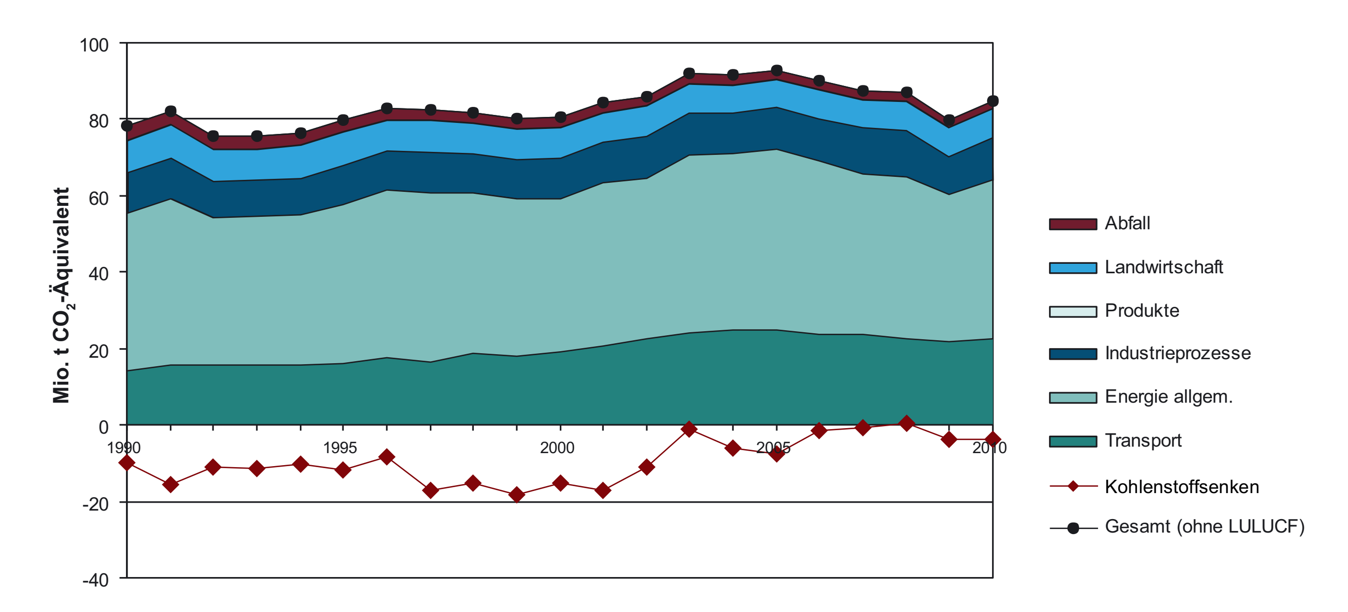


Abbildung S.1.4. Offiziell berichtete THG-Emissionen Österreichs (nach IPCC Quellsektoren mit gesondert ausgewiesen Emissionen des Transports). Die weitgehend unter der Nulllinie liegende Kurve gibt die „Kohlenstoffsenken" wieder. In den letzten Jahren war diese Senke deutlich geringer bzw. in manchen Jahren gar nicht mehr vorhanden. Dies war vor allem eine Folge höherer Holzeinschläge; auch Veränderungen in der Erfassungsmethode trugen zu diesem Ergebnis bei;. Quelle: Anderl et al. (2012)

Figure S.1.4. Officially reported greenhouse gas emissions in Austria (according to the IPCC source sectors with especially defined emissions for the Transport sector). The brown line that is mainly below the zero line represents carbon sinks. The sector "Land use and land use change" (LULUCF) represents a sink for carbon and is therefore depicted below the zero line. In recent years, this sink was significantly smaller and no longer present in some years. This was mainly a result of higher felling; and changes to the survey methods contributed to this as well. Source: Anderl et al. (2012)

on wird beim Erhitzen von Karbonatgestein CO_2 freigesetzt, was für 2010 immerhin 1,6 Mt CO_2 oder fast 2 % der gesamten österreichischen THG-Emissionen ausmacht. Die Kalkproduktion führt zu 574 kt CO_2. Magnesium-Sinterung und „Kalkstein- und Dolomitverbrauch" tragen jeweils ca. 300 kt CO_2 bei, wobei letztere Zuschlagsstoffe im Hochofenprozess darstellen.

Die Emissionen von **fluorierten Gasen** (Fluorkohlenwasserstoffe, F-Gase) werden ebenfalls primär den industriellen Prozessen zugeordnet. F-Gase weisen eine hohe Klimawirksamkeit auf, da sie atmosphärische Verweilzeiten bis zu mehreren hundert Jahren besitzen. Der Sektor mit der größten Zunahme von F-Gasen ist der Kälte- und Kühlmittelbereich, der stationäre und mobile Kühlgeräte, Klimaanlagen und Wärmepumpen umfasst. Ab 2011 dürfen nach einer europäischen Richtlinie nur noch F-Gase mit einem GWP kleiner als 150 eingesetzt werden. Die Verwendung von F-Gasen in anderen Anwendungsbereichen (ausgenommen als Löschmittel und in elektrischen Schaltanlagen) ist rückläufig, allerdings kommt es noch zu Emissionen aus Restbeständen bzw. Altgeräten.

Im Bereich **Landwirtschaft** gibt es bedeutende Emissionen von CH_4 und N_2O, die aus der Wiederkäuerverdauung, dem Management von Wirtschaftsdünger und den Böden stammen (die Emissionen aus dem Energieeinsatz der Landwirtschaft hingegen werden im Bereich Energie verbucht). Die Landwirtschaft war im Jahr 2010 mit 7,5 Mt CO_2-Äq für 8,8 % der österreichischen THG-Emissionen verantwortlich. Die wichtigsten Quellen landwirtschaftlicher THG-Emissionen im Jahr 2010 stellen mit einem Anteil an den gesamten österreichischen THG-Emissionen von 3,9 % die direkten verdauungsbedingten CH_4-Emissionen aus der Viehhaltung sowie mit 0,4 % die CH_4-Emissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement dar, bei dem auch N_2O freigesetzt wird, das 1 % zu den österreichischen Emissionen beiträgt. Einen herausragenden Beitrag stellen die N_2O-Emissionen (3,4 % im Jahr 2010) aus der Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Böden dar. Wälder zeigen in der Regel geringere N_2O-Emissionsraten als landwirtschaftliche Flächen, jedoch ist ihr Anteil an den Gesamtemissionen wegen der großen Waldfläche in Österreich bedeutsam. Die Ermittlung von N_2O-Bilanzen von der Landschaftsebene bis hin zur kontinentalen Ebene ist nach wie vor eine ungelöste Herausforderung.

Biomasse, insbesondere das Holz in Wäldern, ist ein beträchtlicher Speicher für Kohlenstoff. Traditionell wuchs dieser Speicher in Österreich, die **Wald-Biomasse stellte daher in der Vergangenheit in den meisten Jahren eine beträcht-**

liche CO_2-Senke dar; die Sequestrierung ist allerdings in den letzten Jahren zurückgegangen bzw. in manchen Jahren ganz zum Erliegen gekommen.. Österreich verfügt über fast 4 Mio. ha Wald (47,6 % der Landesfläche) und damit über einen großen Kohlenstoffvorrat (1990: 1 243 ±154 Mt CO_2 oder 339 ±42 Mt C in der Biomasse und 1 698 ±678 Mt CO_2 oder 463 ±185 Mt C im Boden), der dank nachhaltiger Waldbewirtschaftung erhalten wird. Die Waldfläche nimmt seit den 1960er Jahren in allen Höhenlagen zu, am stärksten in den Hochlagen über 1 800 m Seehöhe. Als Folge des Klimawandels (Verlängerung der Vegetationsperiode), der Verbesserung der Waldernährung (atmosphärische Einträge von Stickstoff) und der Optimierung der Waldbewirtschaftung befindet sich der Holzvorrat auf einem Rekordniveau (2007 / 09 1 135 Mio. Vorratsfestmeter). Durch die Erhöhung des Holzeinschlages und der Entnahme besonders wüchsiger Bestände ist allerdings die durchschnittliche Produktivität leicht rückläufig.

Im Sektor **Abfallwirtschaft** hat die Deponierung von Müll aufgrund der freigesetzten Deponiegase (CH_4 und CO_2, aber auch FCKWs und N_2O) einen nicht vernachlässigbaren Anteil an den THG-Emissionen. THG entsteht auch bei Müllverbrennungsanlagen sowie im Bereich von Kläranlagen. Die Verhinderung der Emission von CH_4, das aus anaeroben Umwandlungsprozessen von biologisch abbaubaren Kohlenstoffverbindungen resultiert, stellt eine vordringliche Maßnahme für den nachhaltigen Klimaschutz in der Abfallwirtschaft dar.

Modellierungen der THG-Emissionen für den Bereich Restmüllbehandlung ergaben für 2006 einen Anteil an den österreichischen CO_2- und CH_4-Emissionen (84 220 kt CO_2-Äq.) mit ca. 1 250 kt CO_2-Äq. von rund 1,5 %. Im Vergleich zu 1990 war eine stete Abnahme der sektoralen Emissionen durch Emissionsverminderungen bei der Mülldeponierung von ursprünglich 2 030 kt CO_2-Äq. zu verzeichnen, dies entspricht einem Rückgang um mehr als 38 %. Damit sanken die sektoralen spezifischen Emissionen um ca. 18 % auf 0,89 Mg CO_2-Äq. / Tonne Restmüll.

Wenige Sektoren reichen aus, die Zunahme der Gesamtemissionen seit 1990 zu erklären. Zu Zunahmen kam es vor allem im Sektor Transport, die zum Teil auf Kraftstoffexport im Tank (Tanktourismus) zurückgeführt werden können: Wegen des niedrigeren Preises in Österreich gekauften Treibstoffs wird von durchfahrenden LKWs (aber auch PKWs) überproportional in Österreich getankt (und damit Österreichs Emissionen zugerechnet), obwohl die damit ermöglichte Fahrleistung auch im Ausland erbracht wird. Der Anteil dieses Treibstoffexports wird auf bis zu 30 % der verkehrsbedingten CO_2-Emissionen geschätzt, allerdings sind diese Schätzungen mit großen Unsicherheiten verbunden. Die Treibstoffpreise sind in Österreich seit den 1990er Jahren niedriger als in den wichtigsten Nachbarländern. Umgekehrt sind Kohlenstoffsenken verloren gegangen: Die in den 1990er-Jahren aktive Kohlenstoffsenke Wald verliert ab etwa 2003 an Wirksamkeit, da aufgrund verbesserter forstlicher Nutzung die Biomasse im Wald sich nicht weiter akkumuliert (Abbildung S. 1.4).

Die **Konzentration von atmosphärischem CO_2** wird seit 1999 und seit 2012 auch die **Konzentration von CH_4** im Rahmen des Global Atmosphere Watch-(GAW-)Programmes der WMO am Hohen Sonnblick (3 106 m Seehöhe) gemessen. Die Konzentration von CO_2 ist im Winter aufgrund höherer Emissionen und geringerer Aufnahme durch Pflanzen höher als im Sommer. Die Jahresmittelwerte stiegen kontinuierlich von 369 ppm (2001) auf 388 ppm (2009) an (Abbildung S. 1.5). Auch die **Ozonsäule** wird am Sonnblick seit 1994 bestimmt. Bei Vergleichen mit in Arosa gemessenen Werten zeigt sich eine gute Übereinstimmung (±4 Dobson Units). An beiden Messstellen gibt es große Schwankungen von Jahr zu Jahr, die durch meteorologische Einflüsse erklärbar sind.

Inventuren der Freisetzung von Feinstaub (Particulate Matter, PM) wurden vor allem wegen der gesundheitlichen Auswirkungen von PM entwickelt, können aber gemeinsam mit Wissen über die chemischen und physikalischen Eigenschaften der emittierten Partikel auch als Basis für Berechnungen von klimarelevanten Parametern von Aerosolen herangezogen werden. Die PM Inventur Österreichs ermittelt Emissionen von Primäraerosolen, d. h. direkte Partikelemissionen in die Atmosphäre, nicht jedoch Partikel, die mittels atmosphärischer chemischer Reaktionen aus gasförmigen Substanzen entstehen und an Partikeln kondensiertem Materials.

Verkehrsemissionen, insgesamt ca. 44 % der PM2.5[4] Emissionen, umfassen Verbrennungsprodukte vor allem von Dieselmotoren, hauptsächlich Dieselruß und in geringerem Maße von aufgewirbeltem Straßenstaub.

Die **Emissionen der Kleinverbraucher** (etwa 30 % der PM2.5 Emissionen) beinhalten vorwiegend Emissionen aus Heizungen mit Festbrennstoffen, insbesondere Holz, da Kohle als Energieträger kaum noch eingesetzt wird. Relevant sind vor allem alte Heizanlagen und Einzelöfen, die ob ihrer langen Lebensdauer auch noch länger relevant bleiben werden. Bei Emissionen aus dem **Hausbrand** ist elementarer Kohlenstoff (EC; Ruß), ein besonders klimawirksamer Bestandteil des Aerosols, eine bedeutende Komponente. Die Emissionen z. B. eines typischen österreichischen Kachelofens für unterschiedliche Holzarten und Holzbriketts enthalten 9,8 % (Lärchenscheit-

[4] PM2.5 sind Teilchen mit aerodynamischen Durchmessern kleiner als 2,5 Mikrometer.

holz) bzw. 31 % (Weichholz. B.iketts) EC. Emissionsfaktoren für unterschiedliche Biomasse-Feuerungssysteme wurden im Labor unter verschiedenen praxisnahen Betriebsbedingungen bestimmt. Moderne mit Biomasse befeuerte Heizsysteme bedingen demnach sehr geringe, die noch verbreitet im Einsatz befindlichen Einzelöfen und Scheitholzkessel jedoch erhebliche Rußemissionen, die die Vorteile der Vermeidung fossiler CO_2-Emissionen wegen den absorbierenden und somit klimawirksamen Eigenschaften von Ruß wieder verringern können.

Die **Partikelneubildung** (Nukleation) in der Atmosphäre ist ein wichtiger Parameter für die Klimarelevanz von Aerosolen, wobei in der Atmosphäre durch meist photochemische Reaktionen von Vorläufergasen (z. B. NH_3, NO_x, SO_2, flüchtige organische Verbindungen, VOC) **sekundäre anorganische** (meist Sulfate, Nitrate) und **sekundäre organische Aerosole** (SOA) entstehen. Eine Abschätzung der Menge an Sekundäraerosol, das aus den Vorläufergasen gebildet wird, liegt für Österreich nicht vor.

Eine besondere Bedeutung kommt **sekundären organischen Aerosolen (SOA)** zu, die derzeit intensiv erforscht werden. Durch den Ferntransport von Vorläufergasen kann es zu erhöhten Konzentrationen von O_3 und Aerosolpartikeln in quellfernen Gegenden kommen.

Die von den öffentlichen Messnetzen erfassten Massenkonzentrationen von Aerosolen alleine lassen keinen Schluss auf die Klimarelevanz der Aerosole zu, sie können jedoch gemeinsam mit anderen Parametern (wetterlagentypische Größenverteilung; chemische Zusammensetzung) dazu dienen, Hinweise auf klimarelevante Aerosoleigenschaften zu liefern. Die atmosphärischen Konzentrationen von Aerosolen sind einerseits von den Emissionen (siehe oben), andererseits von den meteorologischen Verhältnissen bzw. den Ausbreitungsbedingungen abhängig.

Die **chemische Zusammensetzung** des atmosphärischen Aerosols, die auch seine klimarelevanten Parameter über den Brechungsindex und die Hygroskopizität der Partikel beeinflusst, gibt Auskunft über Quellen und chemische Umwandlungen in der Atmosphäre. In Österreich wurden mit Hilfe eines „Makro-Tracer"-Modells die Quellen Straßenstaub und Auftausalz, anorganisches Sekundäraerosol, Holzverbrennung und der Kfz-Verkehr als wichtigste **Aerosolquellen** identifiziert, wobei der relative Beitrag der einzelnen Quellen regional und zeitlich variabel ist. Der Beitrag von **Holzrauch** zum organischen Kohlenstoff (OC) im Aerosol lag zwischen einem Drittel und 70 %, der Beitrag zu PM10 zwischen 7 und 23 %. „**Brauner Kohlenstoff**" (BrC) aus Biomassefeuern kann unter bestimmten Bedingungen Ruß aus den üblichen Verkehrsquellen deutlich übersteigen.

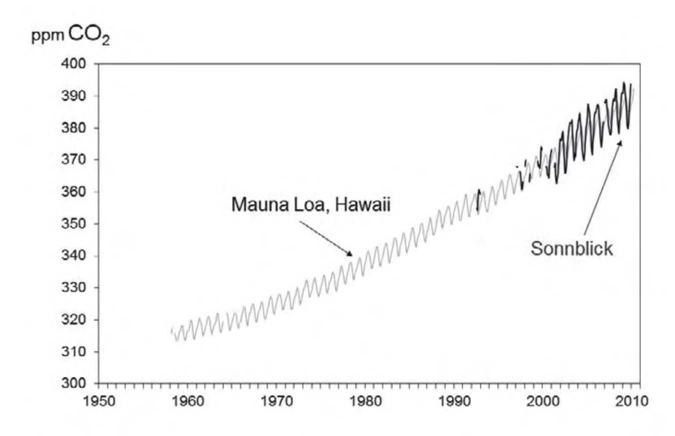


Abbildung S.1.5. CO_2-Zeitreihen am Sonnblick (schwarze Linie) im Vergleich zu den Messungen auf Mauna Loa (graue Linie) für die letzten ca. 50 Jahre. Quelle: Böhm et al. (2011)

Figure S.1.5. Time series of CO_2 at Sonnblick Observatory (black line) in comparison with the measurements at Mauna Loa Observatory (grey line) for the last 50 years. Source: Böhm et al. (2011)

Das Sonnblick Observatorium in 3106 m Seehöhe ist eine wichtige Hintergrundmessstelle für Aerosole und Gase in Österreich. Messungen der chemischen Zusammensetzung des Aerosols zeigen die Änderungen über die letzten 20 Jahre sowie die Unterschiede zwischen dem Aerosol der freien Troposphäre (Winter) und dem der bodennahen Schichten (Sommer; Abbildung S. 1.6). Ferntransport von Luftmassen (z. B. Saharastaub) kann während des gesamten Jahres beobachtet werden. Das Aerosol am Sonnblick wurde auch hinsichtlich seiner Wechselwirkung mit Wolken untersucht. Die „**scavenging efficiency**" von Ruß (d. h. der Anteil, der in den Tropfen zu finden ist) ist geringer als die von Sulfat (im Mittel 54 % gegenüber 78 % auf der Rax in 1680 m Seehöhe), jedoch gelangt auf diese Weise ein nicht vernachlässigbarer Teil des Rußes ins Wolkenwasser, wo er die Strahlungseigenschaften der Wolke beeinflussen kann. Der **direkte** Effekt des Aerosols ergab für 90 % relative Feuchte einen **Strahlungsantrieb** zwischen +0,16 W / m² (Boden: alter Schnee) und +11,63 W / m² (Boden: frischer Schnee).

Seit 2005 wird am Sonnblick auch **Kohlenstoff im Aerosol** kontinuierlich bestimmt, der ähnliche Jahresgänge und Konzentrationen aufweist wie Sulfat. Organisches Material (OM) trägt den größten Beitrag zum Gesamtkohlenstoff (TC) bei. Etwa 10 % des OM kann auf Holzverbrennung zurückgeführt werden (Sommer: 4 %, Winter: 23 %).

Wegen des indirekten Effekts des Aerosols auf die Strahlungsbilanz ist Wissen über Wolkenbildungsprozesse und **Wolkenkondensationskerne** (CCN) von hoher Bedeutung. CCN wurden in Österreich an mehreren Stellen gemessen (z. B. Rax, Sonnblick, Wien). Aus den Langzeitmessungen von

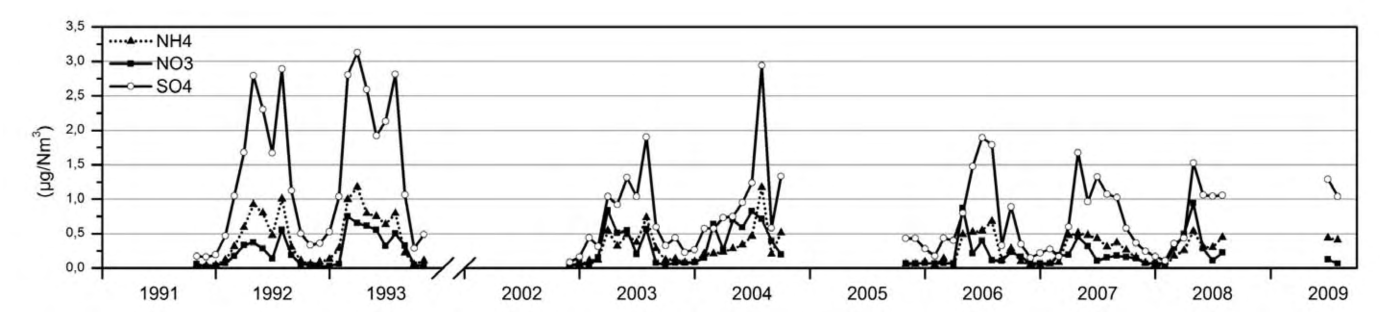


Abbildung S.1.6. Zeitverlauf der Monatsmittelwerte für partikelförmiges Sulfat (SO_4), Nitrat (NO_3) und Ammonium (NH_4) am Sonnblick Observatorium für die Jahre 1991 bis 2009. Datenquellen: Kasper und Puxbaum (1998); Sanchez-Ochoa und Kasper-Giebl (2005); Effenberger et al. (2008)

Figure S.1.6. Temporal variation of monthly mean values of particulate sulphate, nitrate and ammonium at the Sonnblick Observatory from 1991 to 2009. Sources: Kasper and Puxbaum (1998); Sanchez-Ochoa and Kapser-Giebl (2005); Effenberger et al. (2008)

CCN in Wien ergibt sich, dass die CCN-Konzentrationen (bei 0,5 % Übersättigung) zwischen 160 cm³ und 3 600 cm³ mit einem Mittelwert von 820 cm³ liegen. Saisonale Schwankungen wurden nicht beobachtet, jedoch zeigt die CCN-Konzentration große Schwankungen, die durch unterschiedliche meteorologische Situationen gegeben sind (stabile Wetterlagen, Frontdurchgänge).

Insgesamt stellen die Einflüsse von Aerosolen auf das Klima wegen der komplexen Prozesse und Wechselwirkungen eine beträchtliche wissenschaftliche Herausforderung dar. Sie sind der größte Unsicherheitsfaktor bei der Schätzung des Strahlungsantriebes.

S.1.3 Klimaänderung in der Vergangenheit
S.1.3 Historic Climate Changes

Um den aktuellen Klimawandel einordnen zu können, werden die natürlichen Klimaänderungen beschrieben, die für die aktuelle erdgeschichtliche Periode – das Quartär (=Pleistozän und Holozän) – maßgeblich sind. Bei der Interpretation dieser Klimaentwicklungen ist zu berücksichtigen, dass die Relevanz von Klimaänderungen für den Menschen wesentlich von dessen Zahl und Lebensweise abhängt. So waren die Menschen im Pleistozän z. B. noch nicht sesshaft und ihre Zahl lag bei etwa 10 % der heutigen.

Das Pleistozän begann vor 2,6 Mio. Jahren und endete vor 11 700 Jahren, es war geprägt durch ein Wechselspiel von langen Glazialzeiten („Kaltzeiten") und kurzen Interglazialzeiten („Warmzeiten"), gesteuert durch die orbitalen Schwankungen der Erde (Form der Erdbahn, Neigung und Orientierung der Rotationsachse der Erde). Die Glazialzeiten waren durch ein Klima von enormer Variabilität gekennzeichnet, das in keinem Vergleich zu den Klimaschwankungen des Holozäns steht. Die aus den Eisbohrkernen Grönlands bekannten Dansgaard-Oeschger Ereignisse (Wechsel zwischen sehr kalten Stadialen und – vergleichsweise – warmen Interstadialen) hatten ihren Ursprung in den Instabilitäten der großen Eisschilde und deren Interaktion mit der Tiefenwasserströmung im Atlantik. Sie prägten auch im Alpenraum das dominante Klimamuster. Dies unterstreicht die Synchronität des hochfrequenten glazialen Klimawandels auf überregionaler Ebene. In den kältesten Phasen der Glaziale (den Stadialen) herrschten auch im Alpenvorland arktische Klima-Bedingungen mit sehr kalten Wintern. Die Erwärmungsphasen gingen mit einer sprunghaften Abnahme der Saisonalität (mildere Winter) einher, waren aber beginnend vor ca. 75 000 Jahren zu schwach, um eine ausgedehnte Wiederbewaldung in Österreich zu erlauben. Gegen Ende des letzten Glazials (Würm) begann vor etwa 30 000 Jahren der jüngste eiszeitliche Gletschervorstoß bis über den Alpenrand hinaus. Verlässliche Paläoklimadaten dieser Zeit fehlen bislang für die Alpen; man geht jedoch von einer Jahresmitteltemperatur um mindestens 10 °C unter jener des Holozän aus, verbunden mit einer ausgeprägten Abnahme des Niederschlags gegen Osten hin.

Vor 19 000 Jahren zerfielen die Gletscher im Alpenvorland und in den großen Alpentälern rasch. Eine Reihe von regionalen und lokalen Gletschervorstößen, vornehmlich in den größeren Seitentälern, erfolgte im Einklang mit der Klimaentwicklung im nordatlantisch-europäischen Bereich. Vor ca. 16 500 Jahren war der Niederschlag im zentralen Alpenraum auf etwa die Hälfte bis ein Drittel der heutigen Werte verringert und die Sommertemperatur lag rund 10 °C unter den heutigen Werten. Die Ablationsperiode dauerte an der Schneegrenze der damaligen Gletscher nur etwa 50 Tage, also etwa die Hälfte der gegenwärtigen Dauer. Die Winter waren sehr kalt und trocken und vergleichbar denen in der heutigen ka-

nadischen Arktis. Vor 14 700 Jahren begann innerhalb weniger Jahrzehnte eine Zeit mit deutlich günstigeren interstadialen Bedingungen, in die die Wiederausbreitung der Wälder in den nordalpinen Tälern und Vorländern fällt. Vor 12 900 Jahren begann der massive Klimarückschlag der Jüngeren Dryas, der letzten großen Kaltphase auf der Nordhalbkugel, die wiederum innerhalb weniger Jahrzehnte vor 11 700 Jahren endete. In den Alpen war sie durch bedeutende Gletschervorstöße in den oberen Talbereichen, durch eine deutliche Absenkung der Waldgrenze und eine erhöhte geomorphologische Aktivität durch Permafrost in den unvergletscherten Gebieten gekennzeichnet. Die Schneegrenze lag 300–500 m tiefer als während der Mitte des 20. Jahrhunderts, die Untergrenze des Permafrostes lag mindestens 600 m tiefer. Die Sommertemperatur war etwa 3,5 °C niedriger als zur Mitte des 20. Jahrhunderts, die Jahrestemperatur war noch stärker reduziert. Die Niederschlagssummen waren in den Zentralalpen etwa 20–30 % niedriger als heute, während der Außensaum der Alpen möglicherweise feuchter als heute war.

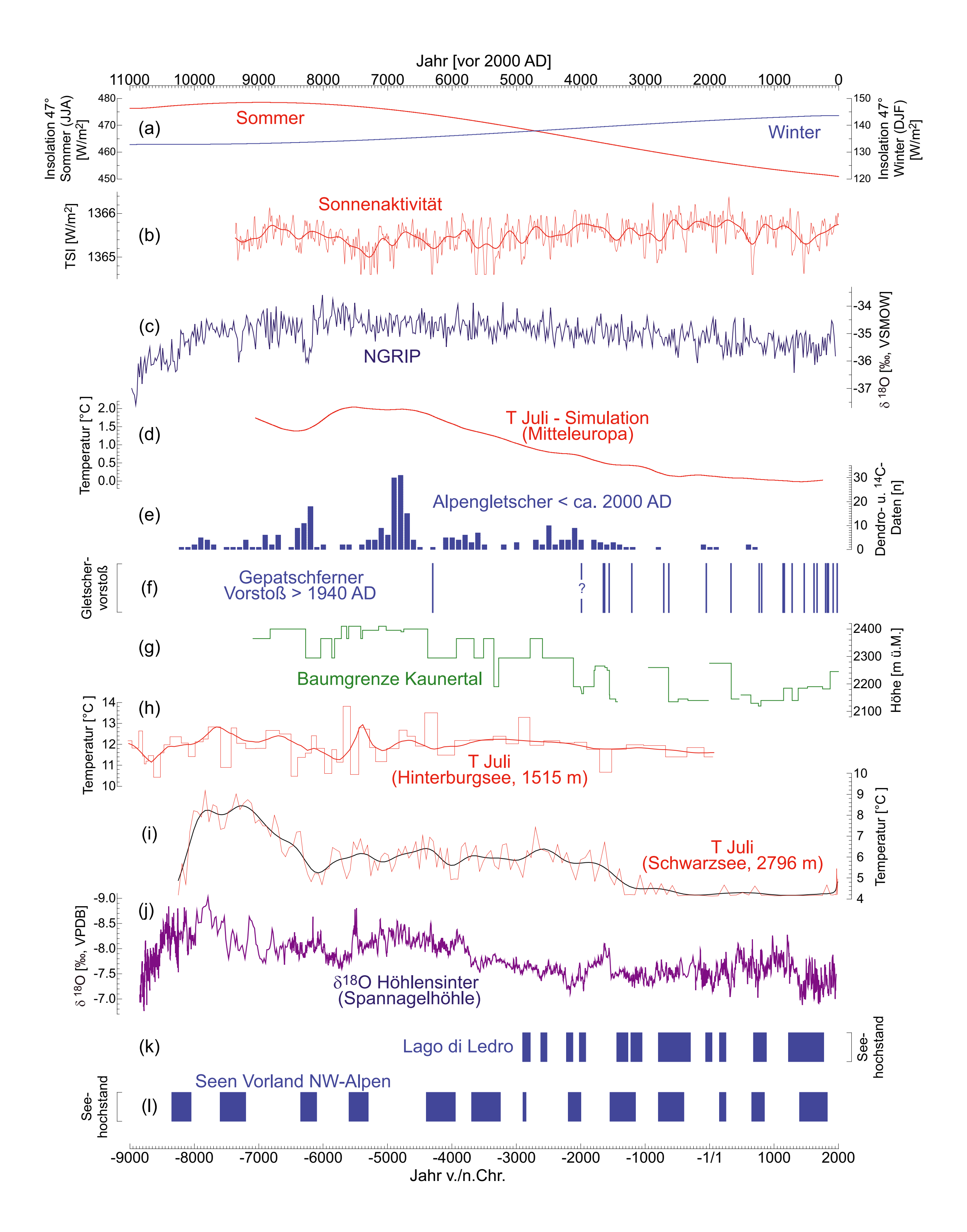
Klima im Holozän. Die ersten Jahrhunderte des Holozäns waren noch durch Gletschervorstöße gekennzeichnet, die deutlich weitreichender als am Höhepunkt der „Kleinen Eiszeit" waren, der Permafrost konnte bis zu 200 m tiefer als heute existieren. Gegenüber dem 20. Jahrhundert waren die Sommertemperaturen im frühesten Holozän etwa 1,5–2 °C tiefer, während die Niederschlagssummen etwa in der heutigen Größenordnung gewesen sein dürften. Eine Auswahl an Rekonstruktionen von Klimagrößen aus Proxydaten findet sich in Abbildung S.1.7.

Dem kühlen Beginn des Holozäns folgte eine deutliche Erwärmung. Nach Rekonstruktionen aus verschiedenen Klimaarchiven Österreichs lagen die Temperaturwerte in den ersten zwei Dritteln des Holozäns meist über dem Mittel des 20. Jahrhunderts. Die Proxy-Daten zeigen als übereinstimmendes Merkmal weiters eine langfristige Temperaturabnahme von etwa 2 °C von den früh- bis mittelholozänen Maxima (bis vor ca. 7 000 Jahren) bis in die vorindustrielle Zeit. Unbestrittene Ursache für diesen Abkühlungstrend ist die Abnahme der Sonneneinstrahlung auf der Nordhemisphäre im Sommer, verursacht durch die orbitale Variabilität. Demgegenüber zeigt ein anderer, vieldiskutierter Klimaantrieb, die Sonnenaktivität, keinen entsprechend langfristigen Trend. Analysen zum Niederschlagsgeschehen im Holozän belegen bisher keine langfristige Entwicklung; vielmehr wechselten sich mehrdekadische bis mehrhundertjährige Perioden mit erhöhtem und reduziertem Niederschlag ab. Zeitperioden mit verstärktem Niederschlag fielen dabei mit Phasen reduzierter Sonnenaktivität zusammen.

Die Gletscher waren im Alpenraum während der letzten rund 11 000 Jahre gekennzeichnet durch lang andauernde Perioden mit vergleichsweise geringer Ausdehnung im frühen und mittleren Holozän (bis vor rund 4 000 Jahren) und mehrfache sowie weitreichende Vorstöße in den folgenden Jahrtausenden, die in den großen Gletscherständen der „Kleinen Eiszeit" (ca. 1260 bis 1860 n. Chr.) kulminierten. Die gegenwärtigen Gletscherausdehnungen wurden im Früh- und Mittelholozän mehrfach sowohl unter- als auch überschritten. Allerdings sind die Alpengletscher derzeit nicht im Gleichgewicht mit dem sie steuernden Klima, was sich im aktuell beobachtbaren starken Rückschmelzen manifestiert. Ein direkter Vergleich der gegenwärtigen mit früheren Gletscherausdehnungen im Hinblick auf die klimatischen Randbedingungen ist daher nur begrenzt möglich.

Das Klima der letzten zwei Jahrtausende. Die letzten 2 000 Jahre zeigten eine Abfolge von warmen und kalten Perioden, die im Schnitt kühler waren als zu Beginn und in der Mitte des Holozäns. Grob können vier Perioden unterschieden werden, beginnend mit der relativ stabilen und milden römischen Warmzeit (von ca. 250 v. Chr. bis 300 n. Chr.). Dieser folgte eine von instabilen, feucht-kalten Sommern geprägte Periode zu Ende der Römerzeit und während des Frühmittelalters (von ca. 300 bis 840 n. Chr.). Daran schloss wieder eine wärmere und stabilere Periode an (Mittelalterliche Warmzeit, von ca. 840 bis 1260 n. Chr.). Zwischen 1260 und 1860 n. Chr. wurde es deutlich kühler; nur einzelne Jahrzehnte wiesen etwas höhere Temperaturen auf. Wegen der generell großen Gletscherausdehnung, die für diese Periode nachweisbar ist, spricht man auch von der „Kleinen Eiszeit". Sowohl mehrere Minima der Sonnenaktivität als auch klimawirksame Vulkanausbrüche traten in dieser Periode auf. Den deutlichen, instrumentell belegten Temperaturanstieg des 20. Jahrhunderts spiegeln die natürlichen Klima-Archive ebenfalls wider, auch wenn viele Proxy-Datensätze um 2000 n. Chr. enden und daher die aktuelle Klimaentwicklung nicht gänzlich erfassen.

Die instrumentelle Periode. Österreich verfügt über ein meteorologisches Messnetz, mit dessen Hilfe die langfristige Klimaänderung im 19. und 20. Jahrhundert gut beschrieben werden kann. Die längste auswertbare Messreihe, jene von Kremsmünster, geht sogar bis ins Jahr 1767 zurück und ist damit eine der längsten durchgehenden Wetteraufzeichnungen in Europa. Für Klimaanalysen des ausgehenden 18. Jahrhunderts können auch Daten der Stationen Wien (alte Universitätssternwarte) und Innsbruck (Universität) herangezogen werden. Besondere Erwähnung verdient das hochalpine Sonnblick-Observatorium, dessen Wetteraufzeichnungen bis ins Jahr 1886 zurück reichen. Die Messstelle befindet sich am



Jahr [vor 2000 AD]
11000
10000
9000
8000
7000
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
Insolation 47° Sommer (JJA) [W/m2]
Insolation 47° Winter (DJF) [W/m2]
(a)
Sommer
Winter
TSI [W/m2]
(b)
Sonnenaktivität
(c)
NGRIP
δ 18O [‰, VSMOW]
Temperatur [°C]
(d)
T Juli - Simulation (Mitteleuropa)
(e)
Alpengletscher < ca. 2000 AD
Dendro- u. 14C-Daten [n]
Gletscher-vorstoß
(f)
Gepatschferner Vorstoß > 1940 AD
?
(g)
Baumgrenze Kaunertal
Höhe [m ü.M.]
Temperatur [°C]
(h)
T Juli (Hinterburgsee, 1515 m)
(i)
T Juli (Schwarzsee, 2796 m)
Temperatur [°C]
δ 18O [‰, VPDB]
(j)
δ18O Höhlensinter (Spannagelhöhle)
(k)
Lago di Ledro
See-hochstand
Seen Vorland NW-Alpen
(l)
Jahr v./n.Chr.

Gipfel des Hohen Sonnblicks in 3106 m Seehöhe direkt am Alpenhauptkamm.

In Österreich ist die Temperatur in der Periode seit 1880 um nahezu 2 °C gestiegen, verglichen mit einer globalen Erhöhung um 0,85 °C. Der erhöhte Anstieg ist speziell auch für die Zeit ab 1980 beobachtbar, in der dem globalen Anstieg von etwa 0,5 °C eine Temperaturzunahme von etwa 1 °C in Österreich gegenübersteht (praktisch sicher, Abbildung S.1.8; Band 1, Kapitel 3) Die saisonale Temperaturentwicklung verlief nicht immer parallel zu der des Jahresmittels, dennoch ist in allen Jahreszeiten eine Erwärmung seit Mitte des 19. Jahrhunderts festzustellen, am geringsten ist die Erwärmung im Herbst. In den rund drei Jahrzehnten von 1950 bis 1980 mit stagnierenden bis abnehmenden Temperaturen spielte wahrscheinlich die abkühlende Wirkung anthropogener Aerosole („Global Dimming") eine wichtige Rolle, die den Effekt der ebenfalls bereits in Anstieg begriffenen THG-Emissionen maskiert hat.

Die Temperaturentwicklung in höheren Luftschichten, abgeleitet aus homogenisierten Radiosondenmessungen, ist in 3000 m Höhe dem Verlauf an hochalpinen Stationen sehr ähnlich. Der am Boden festgestellte stärkere Erwärmungstrend im Alpenraum verglichen mit dem globalen Mittel gleicht sich in höheren Schichten den für die mittleren Breiten sonst gefundenen Erwärmungsraten an. In der Stratosphäre (von 13 bis 50 km Höhe) ist über Österreich – so wie auch global – eine deutliche Temperaturabnahme zu beobachten.

Der **Luftdruck** an Tieflandstationen zeigt einen sehr langfristigen Anstieg von der Mitte des 19. bis gegen Ende des 20. Jahrhunderts, der allerdings um 1990 von einem abrupten Trendwechsel zu nun wieder fallendem Luftdruck abgelöst wurde. Der Luftdruck alpiner Höhenstationen wird zusätzlich durch die Temperatur der Luftmassen beeinflusst, die sich unter den Messstationen befinden. Aufgrund der Erwärmung zeigen diese Stationen einen stärkeren positiven Trend und eine Fehlen des Druck-Abfalls seit 1990. Dieser abweichende Luftdrucktrend der hochalpinen Observatorien verglichen mit jenem des Tieflandes stellt eine Bestätigung der Erwärmung dar, die nicht auf Thermometer-Messungen beruht.

In den letzten 130 Jahren hat die jährliche Sonnenscheindauer an den Bergstationen der Alpen um rund 20 % oder mehr als 300 Stunden zugenommen. Der Anstieg im Sommerhalbjahr war stärker als im Winterhalbjahr

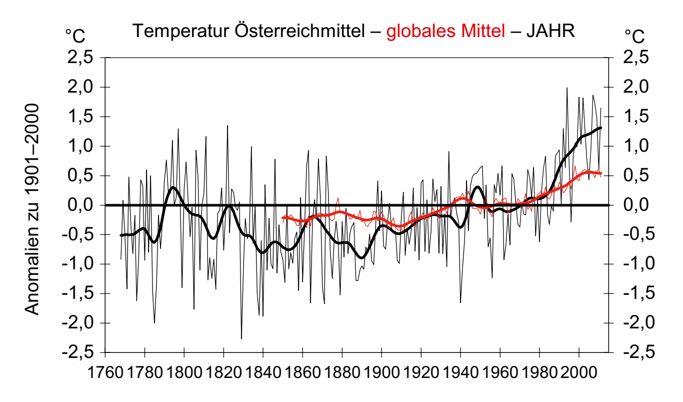


Abbildung S.1.8. Anomalien der Jahresmittel der Lufttemperatur zum Mittel des 20. Jahrhunderts für Österreich (schwarz, 1768 bis 2011) und für das globale Mittel (rot, 1850 bis 2011). Einzeljahre und 20-jährig geglättet (Gauß'scher Tiefpass). Quelle: Böhm (2012), erstellt aus HISTALP (http://www.zamg.ac.at/histalp) und CRU-Daten (http://www.cru.uea.ac.uk/data)

Figure S.1.8. Anomalies in the annual mean air temperature for Austria (1768 to 2011) and the global mean temperature relative to the respective 20th century mean (1850 to 2011). Single values and smoothed values using a 20-year Gaussian low pass filter. Source: Böhm, (2012), source HISTALP (http://www.zamg.ac.at/histalp) and CRU-data (http://www.cru.uea.ac.uk/data)/)

Abbildung S.1.7. (Linke Seite) Holozäne Proxy-Datensätze beziehungsweise Proxy-basierte Klimarekonstruktionen aus Österreich, dem gesamten Alpenraum und Grönland im Vergleich zu ausgewählten Klimaantrieben. a) Entwicklung der Insolation im Sommer (Juni-Juli-August, rot) und Winter (Dezember-Jänner-Februar) für 47°N; b) Rekonstruktion der Sonnenaktivität für die letzten 9000 Jahre; c) Sauerstoffisotopen-Zeitreihe des NGRIP Eisbohrkerns aus Zentralgrönland; d) Simulation der Entwicklung der Juli-Temperatur in Zentraleuropa über die letzten 9000 Jahre bis in die vorindustrielle Zeit; d) dendro- und ^{14}C-datierte Belege für kürzere alpine Gletscher als gegenwärtig (≈1990/2010 n. Chr.); f) nachweisbare Vorstöße des Gepatschferners über eine Größe vergleichbar jener von 1940 n. Chr.; g) Entwicklung der Höhenlage der Baumgrenze im Kaunertal nach Holzfunden; h) Zuckmücken-basierte Rekonstruktion der Juli-Temperatur am Hinterburgsee, Schweiz; i) Zuckmücken-basierte Rekonstruktion der Juli-Temperatur am Schwarzsee ob Sölden; j) Sauerstoffisotopen-Zeitreihe aus Höhlensintern der Spannagel-Höhle; (k) Seehochstände des Lago di Ledro (blau) in den letzten 5000 Jahren; (l) Seehochstände (blau) im Vorland der NW-Alpen bzw. im Jura. Quelle: Zusammengestellt für AAR14

Figure S.1.7. (Left page) Holocene environmental records and proxy-based climate reconstructions from Austria, the Alps and Greenland in comparison with selected climate forcings. a) evolution of insolation during summer (June-July-August) and winter (December-January-February) at 47°N; b) reconstruction of solar variability for the last 9000 years; c)oxygen-isotope record of the NGRIP ice-core, central Greenland; d) simulation of the temperature evolution in July in central Europe over the last 9 000 years until the pre-industrial period ; d) dendrochronologically, i.e. calendar-dated, and 14C-dated evidences for shorter glaciers than today (≈1990/2010 AD); f) established advances of the glacier Gepatschferner beyond the glacier's size in 1940 AD; g) tree-line record in the Kauner valley based on wood remain findings; h) chironomid-based reconstruction of July temperature from lake Hinterburg, Switzerland; i) chironomid based reconstruction of July temperature from Schwarzsee ob Sölden; j) oxygen-isotope record of speleothems from the Spannagel cave; (k) lake-level high-stands of Lago di Ledro during the last 5000 years; (l) lake-level high-stands in the foreland of the NW-Alps and the Jura. Source: Compiled for AAR14

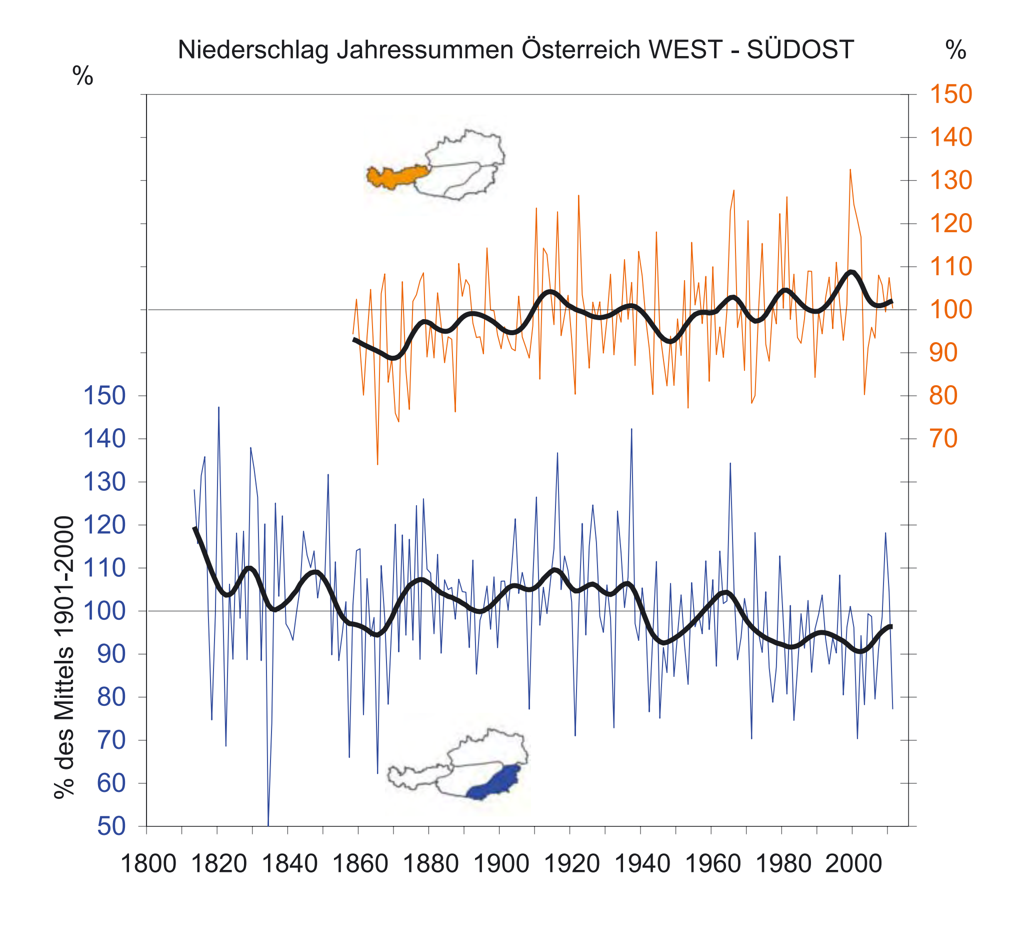


Abbildung S.1.9. Anomalien der Jahressummen des Niederschlages zum Mittel des 20. Jahrhunderts für zwei Subregionen Österreichs („West": oben, „Südost": unten). Einzeljahre und 20-jährig geglättet (Gauß'scher Tiefpass), Zeitreihen aktualisiert bis 2011, Beginn unterschiedlich bis zurück zum Jahr 1813. Grafik: Böhm (2012), erstellt aus HISTALP-Daten http://www.zamg.ac.at/histalp

Figure S.1.9. Anomalies of the annual precipitation totals relative to mean of the 20th century for two Austrian subregions (top: "West", bottom: "Southeast"). Single values and 20-year smoothed values (Gaussian low pass filter). Timeseries date back to 1813, but with differing starting dates, and continue through to 2011. Copyright by R. Böhm (2012), source HISTALP http://www.zamg.ac.at/histalp

(sicher, Band 1, Kapitel 3). Zwischen 1950 und 1980 kam es durch Zunahme der Bewölkung und erhöhter Luftverschmutzung besonders in den Tallagen zu einer deutlichen Abnahme der Sonnenscheindauer im Sommer. Der seit 1980 anhaltende Trend zu mehr Sonnenschein ist begleitet von mehr und längeren sommerlichen Schönwetter-Phasen.

Die Niederschlagsentwicklung in den letzten 150 Jahren zeigt im Gegensatz zur Temperaturentwicklung **deutliche regionale Unterschiede**: In Westösterreich wurde eine Zunahme der Niederschlagsmenge um etwa 10–15 % registriert, im Südosten hingegen eine Abnahme in ähnlicher Größenordnung (Abbildung S.1.9). Inneralpin und im Norden dominieren Variationen in Zeiträumen von rund zehn Jahren. In allen Teilen Österreichs waren die 1860er Jahre besonders trocken, nur im Südosten wurden diese Werte seither wieder erreicht bzw. unterboten und zwar in den trockenen 1940ern und in den anhaltend trockenen Jahrzehnten nach 1970.

Sehr niederschlagsreiche Jahrzehnte gab es in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts. Diese hohen Niederschläge spielten eine bedeutende Rolle für die starken Gletschervorstöße in dieser Zeit, die zu den beiden Maximalständen der Gletscher um 1820 und in den 1850er Jahren führten. Hohe Jahresniederschläge gab es auch in den Jahrzehnten zwischen 1900 und 1940 (Inneralpin und im Südosten beinahe durchgehend, im Westen gedämpft, im Norden gab es eine Unterbrechung durch eine trockene Phase um 1930). Nach den im Norden und im Alpeninneren darauf folgenden Negativtrends gab es hier in den 1970er Jahren eine markante Trendwende, die vor allem im Norden und Nordosten Österreichs im ersten Jahrzehnt des 21. Jahrhunderts ein neues Hauptmaximum des Niederschlages erreichen ließ. Im Westen ist das aktuelle Niederschlagsniveau ebenfalls das höchste seit Beginn der Messreihe (1858). Im Alpeninneren liegt das aktuelle Niederschlagsniveau im langjährigen Durchschnitt des 20. Jahrhunderts, im Südosten – im Zug des fallenden Jahrhunderttrends – rund 10 % unter diesem.

Für das gebirgige Österreich ist die Klimaänderung von großer Bedeutung. Anhand der Klimareihen des Hohen Sonnblicks (3 106 m) werden diese Veränderungen als repräsentativ für das Hochgebirgsklima zusammengefasst. Demnach entspricht die Temperaturänderung im Hochgebirge jener in den Tälern, jedoch ist eine wesentlich stärkere Zunahme der Sonnenscheindauer zu beobachten, was auf europaweite Maßnahmen zur Reinhaltung der Luft zurückgeführt werden kann. Es hat eine deutliche Verschiebung von Schneefall zu Regen stattgefunden; am Hohen Sonnblick fällt jetzt rund bereits 30 %

des Niederschlages als Regen. Der mittlere Luftdruck steigt im Gebirge – ein Zeichen für die Erwärmung der darunterliegenden Luftmassen. Beträchtlicher Rückgang der Gletscher und Auftauen des Permafrostes sind ebenfalls dokumentiert (Band 1, Kapitel 5).

Österreich hat sehr gute langjährige meteorologische Messreihen. Dieses hohe Potential eignet sich hervorragend um durch weitere Verbesserung sowohl im instrumentellen Bereich als auch in der Datenanalyse und Verschmelzung der Daten mit Modellen die international sehr gute Stellung Österreichs weiter auszubauen. Hier bieten sich vor allem auch internationale Kooperationen zur Erstellung von räumlich und zeitlich hochaufgelösten Datensätzen für den Alpenraum und Europa an. Weiters wäre es vorteilhaft weniger gut ausgebaute Messnetze – wie etwa zur Bestimmung von natürlichem THG, Aerosolen und Strahlung zu stärken.

S.1.4 Zukünftige Klimaentwicklung
S.1.4 Future Climate Change

Um räumlich detaillierte Aussagen über die Zukunft unseres Klimas machen zu können, kommen vornehmlich regionale Klimamodelle zum Einsatz, welche in die Ergebnisse aus globalen Klimamodellen eingebettet werden. Wie bei den globalen Modellen wird die Vielfalt der Modelle genutzt, um robuste von weniger robusten Ergebnissen zu unterscheiden. Es gibt bereits zahlreiche Modellsimulationen für Vergangenheit und Zukunft, die den Alpenraum bzw. Österreich abdecken. Im Folgenden werden vor allem Simulationen analysiert, die auf dem A1B-Emissionsszenario, also einem Szenario mit starkem Anstieg der THG-Konzentrationen, beruhen. Die Wahl eines einzigen Szenarios dient der besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse, die Wahl dieses konkreten Szenarios macht einerseits die möglichen Änderungen deutlicher als ein optimistischeres Szenario (mit geringerem Emissionszuwachs) und liegt andererseits näher an der derzeitigen Emissionsentwicklung. Darüber hinaus entspricht die Wahl eher dem eingangs beschriebenen Vorsorgeprinzip.

Ein weiterer Temperaturanstieg in Österreich ist zu erwarten (sehr wahrscheinlich, Band 1, Kapitel 4; siehe auch Abbildung S.1.10). Dieser wird in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts wegen der Trägheit des Klimasystems, der Langlebigkeit von THG in der Atmosphäre sowie der Trägheit der sozio-technischen Systeme nur wenig vom Emissionsszenario beeinflusst und beträgt etwa 1,4 °C. Die Temperaturentwicklung danach wird sehr stark bestimmt durch die vom Menschen in den kommenden Jahren verursachten THG-Emissionen und ist daher wesentlich beeinflussbar. (sehr

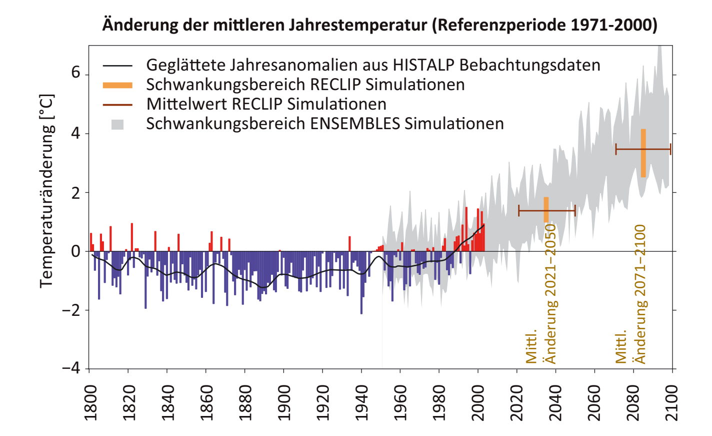


Abbildung S.1.10. Mittlere Oberflächentemperatur (°C) in Österreich von 1800 bis 2100, angegeben als Abweichung vom Temperaturmittel der Periode 1971 bis 2000. Messungen bis zum Jahre 2010 sind in Farbe dargestellt, Modellberechnungen für ein IPCC-Szenario im höheren Emissionsbereich (IPCC SRES A1B Szenario) in Grau. Wiedergegeben sind Jahresmittelwerte (Säulen) und der über 20 Jahre geglättete Verlauf (Linie). Man erkennt die Temperaturabnahme bis knapp vor 1900 und den starken Temperaturanstieg (um ca. 1 °C) seit den 1980er Jahren. Bis Ende des Jahrhunderts ist bei diesem Szenario ein Temperaturanstieg um 3,5 °C zu erwarten (RECLIP Simulationen). Quelle: ZAMG

Figure S.1.10. Mean surface temperature in Austria since 1800 (instrumental observations, in colour) and expected temperature development until 2100 (grey) for one of the higher emission IPCC scenarios (IPCC SRES A1B), shown as a deviation from the mean 1971 to 2000. Columns represent annual means, the line smoothed values over a 20 year filter. The slight temperature drop until almost 1900 and the strong temperature increase (about 1 °C) since the 1980´s can be clearly seen. For this scenario, a temperature increase of 3.5 °C until the end of the century is expected (RECLIP Simulations). Source: ZAMG

wahrscheinlich, Band 1, Kapitel 1) In Abbildung S.1.10 ist die Temperaturentwicklung in Österreich von 1800 bis 2100, angegeben als Abweichung vom Temperaturmittel der Periode 1971 bis 2000, für das A1B-Emissionsszenario dargestellt. Die mittleren erwarteten Veränderungen der Temperatur im Alpenraum im Zeitraum 2021 bis 2050 verglichen mit der Referenzperiode 1961 bis 1990 sind +1,6 °C (0,27 °C pro Jahrzehnt) im Winter und +1,7 °C (0,28 °C pro Jahrzehnt) im Sommer. Damit liegt der Alpenraum nahe dem Europa-Mittel der Erwärmung. So gut wie sicher ist allerdings unter dem A1B-Emissionsszenario eine weitere Erwärmung um etwa +3,5 °C bis zum Ende des 21. Jahrhunderts und damit eine größere Erwärmung als im europäischen Schnitt (+2.7 °C).

Im 21. Jahrhundert ist eine Zunahme der Niederschläge im Winterhalbjahr (um etwa 10 %) **und eine Abnahme im Sommerhalbjahr** (um etwa 10–20 %) **wahrscheinlich**, (Band 1, Kapitel 4). Im Jahresdurchschnitt zeichnet sich kein deutlicher Trend ab, da der Alpenraum im Übergangsbereich

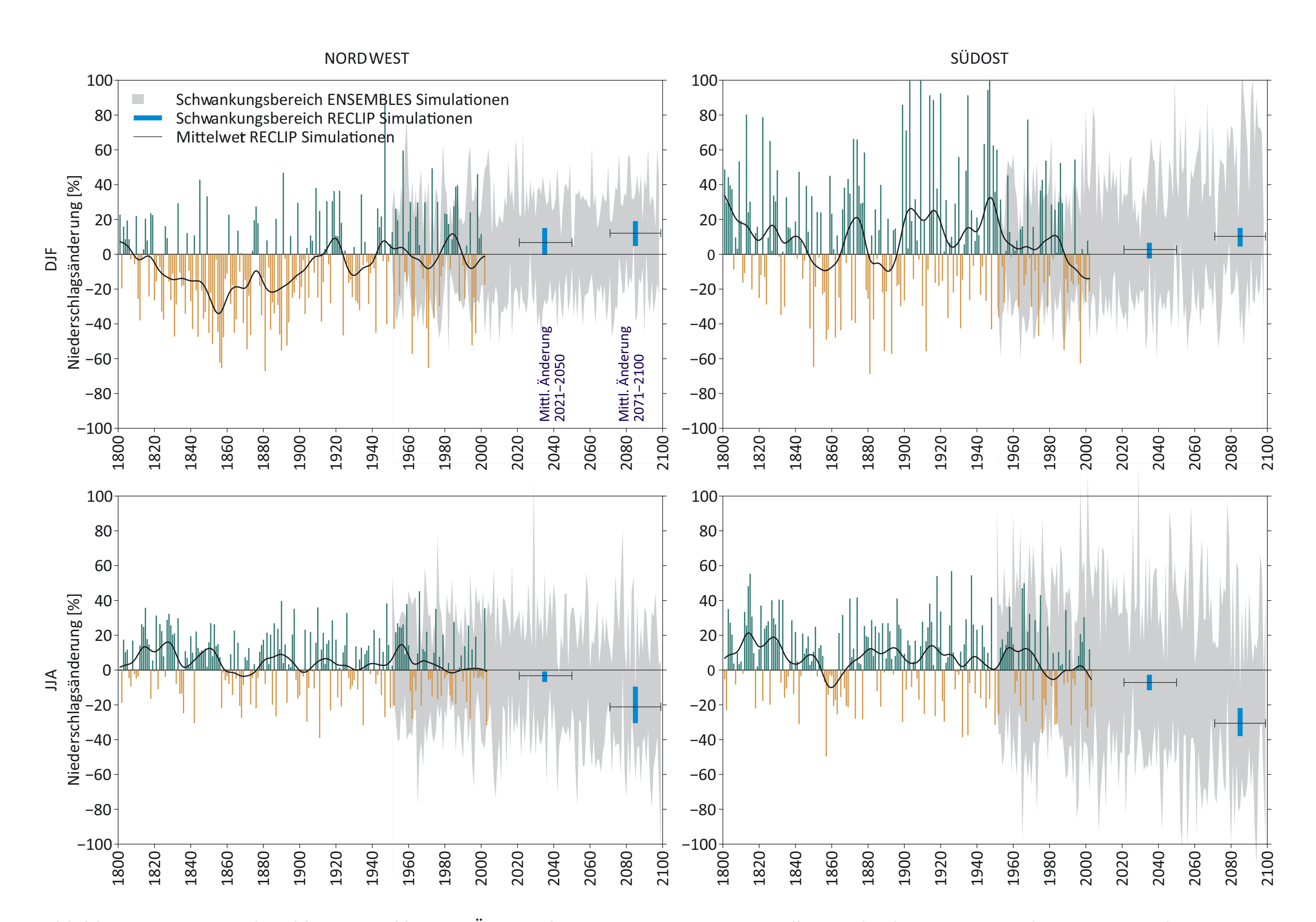


Abbildung S.1.11. Niederschlagsentwicklung in Österreich seit 1800 aus instrumentellen Beobachtungen sowie die zu erwartende Niederschlagsentwicklung für die Zukunft bis 2100, dargestellt als Abweichung gegenüber dem Mittel 1971 bis 2000. Die Abbildungen oben beziehen sich auf den Winter (DJF: Dezember bis Februar), die Abbildungen unten auf den Sommer (JJA: Juni bis August). Das gesamte Bundesgebiet wurde in zwei Regionen (Nord-West und Süd-Ost) unterteilt. Die Beobachtungsdaten für die Vergangenheit stammen aus der HISTALP Datenbank, die Szenarien für die Zukunft entstammen 22 Ensembles–Simulationen (www.ensembles-eu.org, Darstellung als graue Balken für Einzeljahre) sowie aus reclip:century (http://reclip.ait.ac.at/reclip_century, farbige Balken für die Zeitscheiben 2021 bis 2050 und 2071 bis 2100)

Figure S.1.11. Precipitation development in Austria since 1800 (instrumental observations) and expected development to 2100, shown as a deviation from the mean 1971 to 2000. Bars at the top show the winter season (December to February, DJF), the bars at the bottom the summer season (June to August, JJA). The region of Austria is divided (north-west and south-east) into two regions. The observational data for the past stem from the HISTALP database, scenarios for the future from the 22 ensemble simulations (www.ensembles-eu.org, grey bars for single years) and from reclip: century (http://reclip.ait.ac.at/reclip_century, coloured bars for the time slices 2021 to 2050 and 2071 to 2100)

zwischen zwei Zonen entgegengesetzten Trends liegt. (wahrscheinlich, Band 1, Kapitel 4). In Abbildung S.1.11 ist die Niederschlagsentwicklung für die Nordwest- und die Südosthälfte Österreichs, getrennt nach Winter und Sommer von 1800 bis 2100 als Abweichung vom Mittel der Periode 1971 bis 2000 dargestellt. Aus mehreren Modellen lässt sich eine Tendenz zur Niederschlagszunahme nördlich der Alpen im Frühling, Sommer und Herbst erwarten, während die südlichen und westlichen Teile des Alpenraumes Abnahmen aufweisen. Diese räumlich differenzierten Niederschlagsänderungen sind jedoch mit großen Unsicherheiten verbunden. In Abbildung S.1.11 ist der Jahresgang der Änderung für die Perioden 2021 bis 2050 und 2069 bis 2098 dargestellt. Obwohl schon zu Mitte des 21. Jahrhunderts (links) die bereits beschriebene Tendenz zu mehr Niederschlag im Winter und weniger Niederschlag im Sommer im Median zu erkennen ist, zeigen die Modelle in dieser Periode keinerlei Einigkeit über die Richtung der Änderung. Zu Ende des 21. Jahrhunderts (rechts), zeigt sich aber unter dem A1B-Szenario eine sehr deutliche Tendenz zu trockeneren Verhältnissen im Sommer (etwa 20 % weniger Niederschlag) und feuchteren Verhältnissen im Winter (etwa +10 %).

Bei der Globalstrahlung (kurzwellige Sonnen- und Himmelsstrahlung) zeigt sich, ähnlich wie beim Niederschlag, bis

zur Mitte des 21. Jahrhunderts kaum eine Veränderung und dies über das gesamte Jahr hinweg. Zu Ende des Jahrhunderts ergibt sich allerdings eine deutliche Zunahme im Sommer sowie eine Abnahme im Winter (Abbildung S.1.12). Dies ist konsistent mit den Niederschlagsprojektionen, da winterliche, niederschlagsproduzierende Wolken die Sonneneinstrahlung abschirmen.

Die deutliche Abnahme der relativen Feuchte, gegen Ende des Jahrhunderts um ca. 5 %, resultiert vor allem aus den niederschlagsärmeren Sommermonaten. Die Projektionen zur Windgeschwindigkeit sind mit großen Unsicherheiten behaftet – die Modelle ergeben abweichende Vorzeichen – doch ist gegen Ende des Jahrhunderts nach den meisten Modellen eher mit einer Abnahme der Windgeschwindigkeit zu rechnen, als mit einer Zunahme (Abbildung S.1.12).

Methodische Fortschritte zur Optimierung der Schnittstelle zwischen der rein physikalischen Klimamodellierung zur immer wichtiger werdenden Untersuchung der regionalen Auswirkungen des Klimawandels sind erforderlich und versprechen eine vergleichsweise schnelle Qualitätsverbesserung in der Klimafolgenforschung. Dazu ist auch ein besseres Verständnis kleinräumiger Prozesse und von Extremereignissen sehr wichtig.

S.1.5 Extremereignisse
S.1.5 Extreme events

Extreme Wetterereignisse können signifikante Auswirkungen auf die Natur, die Infrastruktur und das menschliche Leben haben. Sie sind jedoch statistisch schwer zu erfassen, da Änderungen seltener Ereignisse sich nur in langen Zeitreihen erkennen lassen – je extremer das Ereignis, desto länger die benötigte Zeitreihe. Unsicherheiten bezüglich Häufigkeit und Intensität kleinräumiger extremer Ereignisse, wie Gewitter oder Hagelereignisse, für Vergangenheit und Zukunft sind auch Folge mangelnder räumlicher und zeitlicher Auflösung der verfügbaren Klimadaten bzw. der Klimamodelle. In Österreich werden statistische Untersuchungen dadurch erschwert, dass die meisten älteren Zeitreihen von Tagesdaten im 2. Weltkrieg verloren gingen, lediglich die Zeitreihen der Monatsmittelwerte sind erhalten geblieben. Zusätzlich stellt die hohe Nichtlinearität der Phänomene, die zu Extremereignissen führen, eine noch nicht vollständig gelöste wissenschaftliche Herausforderung dar. Dennoch können einige Aussagen zu Extremereignissen gemacht werden insbesondere wenn sich Überlegungen oder Berechnungen auf die den Ereignissen zugrunde liegenden Prozesse stützen.

Temperaturextreme nehmen zu (Hitze). Analysen, die auf homogenisierten täglichen Temperaturextremen seit 1950 beruhen, zeigen österreichweit eine Zunahme der heißen Tage sowie eine Zunahme von warmen Nächten. Parallel dazu haben kalte Tage und kalte Nächte markant abgenommen. Mit dem Anstieg der Temperaturextreme hat sich die Zahl der Frost- und Eistage reduziert. **Im 21. Jahrhundert werden Temperaturextreme, z. B. die Anzahl der heißen Tage, deutlich mehr werden** (sehr wahrscheinlich, Band 1, Kapitel 4). Nach Modellberechnungen erhöht sich in Österreich die Temperatur während den Hitzeperioden im Sommer um 4 °C bis zum Ende des 21. Jahrhunderts. Die Häufigkeit im Auftreten von Hitzewellen wird dabei von rund fünf auf etwa 15 pro Jahr am Ende des Jahrhunderts ansteigen. An den zwei heißesten Wiener Stationen ergibt sich ein Anstieg der Hitzetage von derzeit rund 15 Ereignissen im Mittel auf etwa 30 bis zur Mitte des Jahrhunderts und bis zum Ende des Jahrhunderts liegen die Werte zwischen 45 und 50 Ereignissen. Gleichzeitig nehmen kalte Nächte mit Frost in der Innenstadt von derzeit rund 50 Ereignissen auf unter 40 zur Mitte des Jahrhunderts und knapp über 20 am Ende des Jahrhunderts ab (Band 1, Kapitel 3; Band 1, Kapitel 4).

Besonders von Temperaturextremen betroffen sind Städte, da sich Effekte der städtischen Wärmeinseln und des Klimawandel überlagern. So kann in Wien, als Beispiel für den **urbanen Raum,** seit 1951 ein statistisch signifikanter, steigender Trend im Temperaturunterschied zwischen Stadt und dem Umland festgestellt werden. Daraus ergeben sich am Tag besonders hohe Temperaturen und in der Nacht geringe Abkühlung, was zu gesundheitlicher Belastung der StadtbewohnerInnen führt (Band 1, Kapitel 5; Band 3, Kapitel 4). Diese Hitzebelastung wird in Zukunft bei weiter steigenden Temperaturen eine besondere Herausforderung für urbane Räume darstellen. Damit zusammenhängend ist in Zukunft mit höherem Energiebedarf für Raumkühlung zu rechnen, zugleich aber mit sinkendem Heizenergiebedarf (Band 3, Kapitel 5). Zur Reduktion der städtischen Wärmebelastung können städtebauliche Maßnahmen wesentlich beitragen, wie kompakte, aber belüftungswirksame Bebauungsstrukturen, ausreichend Verschattungsmöglichkeiten, Begrünung von Dach-, Fassadenflächen und Straßenraum sowie helle Oberflächen. Angesichts der Langfristigkeit städtischer Planungen und der sich abzeichnenden verstärkten Hitzebelastung der Bevölkerung ist die rechtzeitige Planung derartiger Maßnahmen von größter Wichtigkeit (Band 1, Kapitel 5).

Aussagen zu bisherigen Änderungen der Häufigkeit schadensverursachender Niederschlagsereignisse sind wegen unzureichender Datenlage mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. **Extremwertindizes für Niederschläge,** abgeleitet aus homogenisierten Zeitreihen täglicher Niederschlagssummen,

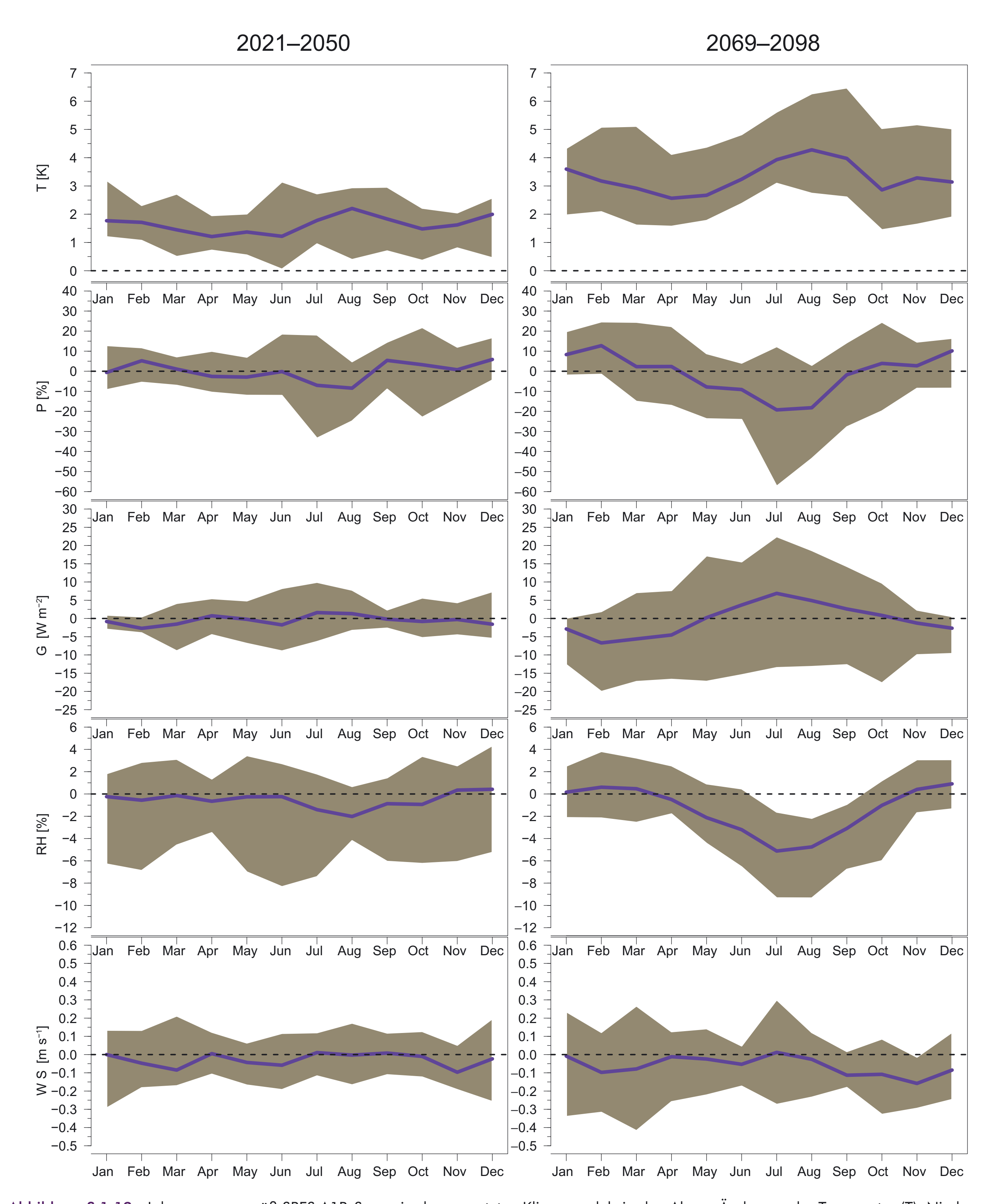


Abbildung S.1.12. Jahresgang gemäß SRES A1B-Szenario des erwarteten Klimawandels in den Alpen: Änderung der Temperatur (T), Niederschlag (P), Globalstrahlung (G), Relative Feuchte (RH) und Windgeschwindigkeit (WS) im Vergleich zur Referenzperiode 1961 bis 1990. Links: 2021 bis 2050, rechts: 2069 bis 2098. Die blaue Linie zeigt den Median und die graue Schattierung den 10%–90% Perzentilbereich des Ensembles aus mehreren Modellen für das SRES A1B Szenario. Quelle: Gobiet et al. (2014)

Figure S.1.12. Annual cycle of expected monthly mean change in the Alpine region of temperature (T), precipitation (P), global radiation (G), relative humidity (RH), and wind speed (WS) relative to the reference period 1961 to 1990 for the SRES A1B-Scenario. Left column: 2021 to 2050, right column: 2069 to 2098. The blue line indicates the median, the grey shading the 10–90th percentile range of the multi model ensemble. Source: Gobiet et al. (2014)

Niederschlagsintensitäten oder maximale Tagesniederschlagssummen, **zeigen bisher weder signifikante noch einheitlichen Trends**. Großräumige Extremniederschläge haben seit 1980 eher zugenommen.

Klimamodelle lassen jedoch für die Zukunft mehr Extremereignisse erwarten. Fast alle Modellstudien über Niederschlagsextreme der Zukunft betrachten allerdings bis dato lediglich die Änderungen von Mittelwerten auf saisonaler Basis oder die Überschreitungswahrscheinlichkeiten von fixen Perzentilen für große Gebiete. Aussagen der Klimaszenarien hinsichtlich Intensität und Häufigkeit der Ereignisse in der Zukunft sind umso belastbarer je größer die räumlich/zeitliche Ausdehnung eines Extremereignisses (z. B. großräumige Trockenperioden; Band 1, Kapitel 4). Je detaillierter die Analysen über Niederschlagsextreme sind, desto größer werden im Allgemeinen die Unsicherheiten und Modelldifferenzen. Oft zeigt sich in den Ergebnissen der Simulationen hoch aufgelöster Regionalmodelle ein derart komplexes räumliches Muster im Klimasignal für die Zukunft, dass eine klare Interpretation nicht möglich ist. Dies gilt insbesondere für extreme Niederschlagsereignisse mit konvektivem Charakter, wie sie bei sommerlichen Schönwetterlagen oder im Alpenvorland besonders häufig vorkommen (Band 1, Kapitel 3; Band 1, Kapitel 4).

Aus einer in der Zukunft wärmeren und absolut feuchteren Atmosphäre lässt sich das Potential für eine erhöhte Wahrscheinlichkeit von **starken Niederschlägen** ableiten. Von Herbst bis Frühling werden starke und extreme Niederschläge wahrscheinlich zunehmen (Band 1, Kapitel 4). Modelle zeigen für Mitteleuropa im Winter eine Erhöhung der Anzahl der Niederschlagstage und auch der Niederschlagsintensitäten um 10 %. Für mehrtägige Starkniederschläge, die wegen der Sättigung des Bodens mit Wasser ein ganz besonderes Hochwasserrisiko darstellen können, lässt sich für Mitteleuropa kein einheitliches Vorzeichen erkennen. Für das Sommerhalbjahr wurden für Österreich Intensitätszunahmen von 17–26 % für 30-jährliche Niederschlagsereignisse für die Periode 2007 bis 2051 gegenüber der Periode 1963 bis 2006 errechnet. Besonders ausgeprägt zeigt sich die Zunahme der Niederschlagsintensitäten im Südosten und Osten Österreichs während der Herbstmonate – möglicherweise ein Hinweis auf eine Verschiebung der Häufigkeit von Wetterlagen im östlichen Alpenraum (Band 1, Kapitel 4).

Für das Hochwasserrisiko in Österreich ist das Klima im Mittelmeerraum von besonderer Bedeutung, da sich Luftmassen über dem Mittelmeer rasch mit Feuchtigkeit anreichen und in den Alpenraum transportiert werden können. Insbesondere das ausgeprägte Niederschlagsmaximum im Süden Österreichs während des Oktobers ist auf die rege Tätigkeit von Tiefdruckgebieten aus dem Mittelmeer (insbesondere jene auf „Vb-Zugbahnen") sowie die hohe Oberflächentemperatur des Mittelmeeres zurückzuführen. Viele verheerende Hochwässer der Vergangenheit wurden mit Vb-artigen Zugbahnen in Verbindungen gebracht, so auch die Ereignisse im Juli 1997, im August 2002, oder auch im August 2005. Wiewohl es noch nicht möglich ist mögliche künftige Änderungen in der Häufigkeit der niederschlagsreichen Vb-Zugbahnen zu quantifizieren, ist doch deutlich, dass in Zukunft ein wärmeres Mittelmeer zu niederschlagsreicheren Vb-Lagen führen kann und dadurch das Risiko für extreme Hochwässer in Österreich steigen könnte (Band 1, Kapitel 4).

Eine langfristige Zunahme der Sturmtätigkeit, abgeleitet aus homogenisierten täglichen Luftdruckdaten, **konnte** – trotz einiger herausragender Sturmereignisse in den letzten Jahren – **nicht nachgewiesen werden**. Auch für die Zukunft ist derzeit keine Veränderung ableitbar. Modelle deuten eine schwache Abnahme der Windgeschwindigkeiten bei 20-jährigen Ereignissen der täglichen Windmaxima an. Allerdings sind die Ergebnisse im Detail unsicher und reichen je nach Modell von +10 % bis −10 % (Band 1, Kapitel 4).

Veränderungen in der Häufigkeit oder Intensität von Gewittern und Hagel sind eine der aktuellsten aber auch schwierigsten zu beantwortenden Fragen der Klimaforschung. In der Analyse von Wetterlagen der letzten Jahrzehnte für Mitteleuropa, die über ein hohes Potenzial für Hagelereignisse verfügen, zeigt sich eine schwache, aber statistisch signifikante, Zunahme des Potentials. Regionale Klimamodellsimulationen lassen in diesem Zusammenhang keine Veränderung für die Zukunft (2010 bis 2050) erkennen (Band 1, Kapitel 4).

Untersuchungen zur Trockenheit zeigen eine Verdreifachung in der Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer Dürre in der Klimazukunft 2071 bis 2100 im Vergleich zur Vergangenheit (1961 bis 1990) für das SRES A1B Szenario. Zudem verlängert sich die Dauer von Dürreperioden und es werden geringere Bodenfeuchtegehalte erreicht als heute. Da der regionale Niederschlag, die lokale Bodenfeuchte und die Persistenzen der atmosphärischen Zirkulation derzeit mit Modellen noch nicht mit hinreichender Verlässlichkeit erfasst werden können, bleiben diese Aussagen mit beträchtlichen Unsicherheiten behaftet (Band 1, Kapitel 4).

Ein besonders von Trockenheit betroffenes Gewässer ist **der größte Steppensee Österreichs, der Neusiedler See**. Er beeinflusst das regionale Klima deutlich, wird durch Tourismus, Wassersport, Schifffahrt und Fischerei stark genutzt und weist darüberhinaus eine einzigartige Fauna und Flora auf. Trotz menschlicher Eingriffe unterliegt der Wasserhaushalt

des Sees im Wesentlichen natürlichen Einflüssen, die stark klimaabhängig sind. Geringfügig niedrigere Niederschläge des Zeitraumes 1997 bis 2004 bei steigender Temperatur führten zu kontinuierlich sinkenden Wasserständen. Insbesondere der niedrige Seewasserstand im Jahr 2003, verursacht durch einen extrem niedrigen Jahresniederschlag und hohe Luft-, bzw. Wassertemperaturen, ließ die Frage aufkommen, ob unter zukünftigen Klimabedingungen eine Austrocknung des Sees zu erwarten sei. Studien ergaben bei einer Erwärmung um 2,5 °C eine Erhöhung der Verdunstung um mehr als 20 %. Um diesen Wasserverlust zu kompensieren, müssten die Niederschläge ebenfalls um etwa 20 % zunehmen, was aufgrund vorliegender Klimaszenarien unwahrscheinlich ist. Eine Reihe trockener Jahre dürfte daher in Zukunft zu sehr niedrigen Seewasserständen bis hin zur Austrocknung führen. Dies kann durch wasserwirtschaftliche Maßnahmen gemildert aber letztendlich nicht verhindert werden. Selbst bei einem mäßigen Absinken des Seepegels werden beträchtliche ökologische und wirtschaftliche Auswirkungen erwartet, daher werden sowohl Vermeidungsstrategien (Zufuhr von zusätzlichem Wasser) als auch Anpassungsmaßnahmen wie Diversifizierung des Tourismusangebots und Ausdehnung der Saison in den Frühling und Herbst erwogen (Band 1, Kapitel 5).

S.1.6 Die Entwicklung weiter denken: Überraschungen, abrupte Änderungen und Kipp-Punkte im Klimasystem
S.1.6 Thinking Ahead: Surprises, Abrupt Changes and Tipping Points in the Climate System

Unerwartete Wettersituationen und neue, überraschende Forschungsergebnisse helfen oft Wissenslücken zu schließen. Eine überraschende Entwicklung der letzten Zeit war etwa die Hypothese, dass der Rückgang des Meereises in der Arktis direkten Einfluss auf Dauer, Schneereichtum und Temperaturniveau der Winter in Europa haben und insbesondere zu häufigeren Kaltluftvorstößen (also extrem kalten Verhältnissen) in Europa führen könnte. Der Rückgang des Meereises in der Arktis ist auch ein Beispiel für eine unerwartet abrupte Änderung im Klimasystem, welche auch in anderen Elementen des Systems vorkommen könnte. Insbesondere die Überschreitung sogenannter Kipp-Punkte kann zu selbstverstärkenden Rückkopplungskreisen und damit zu irreversiblen und sehr starken Änderungen des globalen Klimasystems führen (Band 1, Kapitel 5).

Derartige Störungen sind schwer vorherzusagen, doch ist bekannt, dass verschiedene Komponenten oder Phänomene des Klimasystems in der Vergangenheit abrupten und teilweise irreversiblen Änderungen unterlegen sind. Die Frage nach dem Auftreten von Kipp-Punkten in der Zukunft kann weder eindeutig verneint, noch eindeutig bejaht werden. Es wird aber davon ausgegangen, dass mit steigender Temperatur und insbesondere bei einer Erwärmung von über 2 °C über dem vorindustriellen Niveau, das Auftreten abrupter Änderungen wahrscheinlicher wird. Zusätzlich muss beachtet werden, dass Kipp-Punkte nicht nur im Klimasystem, sondern auch in anderen natürlichen, politischen, ökonomischen und sozialen Systemen aufgrund des Klimawandels erreicht werden können. Derartige Vorgänge implizieren jedoch enorme Auswirkungen auf die menschliche Zivilisation und das Vorsorgeprinzip erfordert, dass sie bei politischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Entscheidungen berücksichtigt werden (Band 1, Kapitel 5).

S.2 Auswirkungen auf Umwelt und Gesellschaft
S.2 Impacts on the Environment and Society

S.2.1 Einführung
S.2.1 Introduction

Mensch und Umwelt sind untrennbar miteinander verbunden. Die Auswirkungen des Klimawandels müssen daher integriert für das Mensch-Umwelt-System betrachtet werden (Abbildung S.2.1; Band 2, Kapitel 1).

Die gegenwärtige Epoche wird auch als Anthropozän bezeichnet. Es gibt (mit wenigen Ausnahmen) kaum noch Orte und Sub-Systeme auf der Erde, die nicht von menschlichen Aktivitäten beeinflusst sind. Da der Mensch so zum Hauptimpulsgeber von Veränderung auf unserem Planeten geworden ist, wurde als Bezeichnung für die aktuelle geologische Epoche der Term Anthropozän („das menschlich Neue") geprägt (Band 2, Kapitel 1). Die vielfältigen Einflüsse des Menschen auf die Umwelt – unter welchen der menschlich verursachte Klimawandel nur einen Aspekt darstellt – erschweren in einigen Bereichen auch die klare Zuordnung von beobachteten Veränderungen zu Änderungen im Klimasystem (Band 2, Kapitel 4). Um die Komplexität der aktuellen Situation zu durchleuchten und mögliche Lösungsansätze in Hinblick auf die zukünftige Entwicklung aufzuzeigen ist es notwendig, den Menschen als zentrale Triebfeder auf allen Maßstabsebenen zu berücksichtigen (Band 2, Kapitel 1).

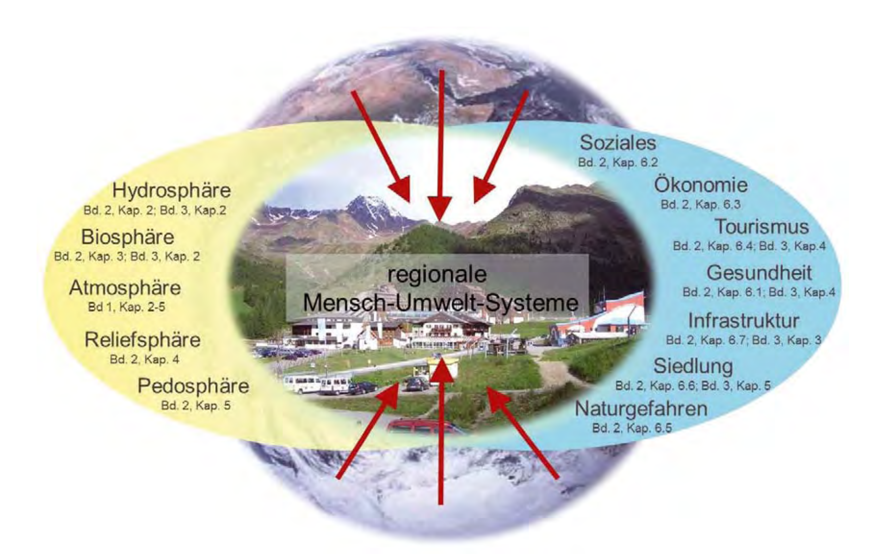


Abbildung S.2.1. Schnittstellen zwischen globalen Einflussfaktoren und lokalen / regionalen Mensch-Umwelt-Systemen als Reaktionssystem zwischen Natur- und Anthroposphäre(n)

Figure S.2.1. Interfaces between global drivers system und local / regional human-environmental systems as a response systems between the natural spheres and the anthroposhere

Der Klimawandel hat sowohl **direkte als auch indirekte Auswirkungen** auf Mensch und Umwelt (Band 2, Kapitel 1). Unter direkten Auswirkungen versteht man all jene Bereiche, in denen sich Änderungen in klimatischen Parametern wie Temperatur oder Niederschlag unmittelbar auswirken. Indirekte Auswirkungen wiederum sind all jene, für welche der Klimawandel über die Beeinflussung eines anderen Prozesses im System – und somit nur mittelbar – wirksam wird. In Bezug auf die Auswirkungen von Klimawandel auf Böden muss zum Beispiel zwischen direkten Effekten von Temperatur auf bodenbürtige Prozesse (wie z. B. Verwitterung) und indirekte Effekte über den Klimaeinfluss auf die am Boden stockende Vegetation (welche z. B. durch totes organisches Material die Humusbildung beeinflusst) unterschieden werden (Band 2, Kapitel 5). In manchen Fällen können die indirekten Effekte des Klimawandels stärkere Auswirkungen haben als die direkten Effekte (Band 2, Kapitel 5; Band 2, Kapitel 6).

Ursachen und Auswirkungen des Klimawandels sind zeitlich und räumlich entkoppelt. Der Mensch ist sowohl Betroffener als auch Verursacher des Klimawandels. Das lokale Handeln jeder einzelnen Person wirkt sich global im Energiehaushalt der Atmosphäre aus. Der damit verbundene globale Klimawandel zeigt jedoch auf der regionalen und lokalen Ebene stark unterschiedliche Ausprägungen und vielfältige Folgeerscheinungen, die zusätzlich oft stark zeitverzögert auftreten können. Das gleiche Prinzip gilt auch für den Klimaschutz. Der individuelle Beitrag zum Klimaschutz ist für jede / n Einzelne / n in seiner Wirkung weder räumlich noch zeitlich direkt wahrnehmbar. In Regionen, in denen ein überdurchschnittlicher Beitrag zu Klimaschutzmaßnahmen geleistet wird, wirkt sich dies nicht durch eine im Vergleich zu anderen Regionen reduzierte Erwärmung oder auch reduzierte Klimafolgen aus. Dieses Dilemma der räumlichen und zeitlichen Entkoppelung zwischen Ursache und Wirkung ist mit hoher Wahrscheinlichkeit eine wesentliche Ursache für die immer noch unvollständige Wahrnehmung des globalen Klimawandels. Weiters leidet darunter auch die Akzeptanz nötiger Maßnahmen im Umgang mit dem Klimawandel, sowohl in Hinblick auf Emissionsminderung als auch auf Klimaanpassung. Die räumlich-zeitliche Entkopplung von Ursache und Wirkung verkompliziert auch Fragen von Verursacher und Geschädigtem / Begünstigtem sowie der globalen Verantwortung für den Klimawandel. Global gesehen sind die gegenüber dem Klimawandel am stärksten verwundbaren Gesellschaften vielfach nicht die Hauptverursacher des Klimawandels, wogegen durch Klimawandel induzierte Vorteile größtenteils den Verursachern zufallen, was globale Fragen der Klimagerechtigkeit aufwirft (Band 2, Kapitel 1).

Die komplexen Auswirkungen des Klimawandels auf das Mensch-Umwelt-System können durch **Vulnerabilität, Resilienz und Kapazität** beschrieben werden**.** Aufgrund der Entkoppelung von Ursachen und Auswirkungen sowie der durch die nichtlinearen Interaktionen über räumliche und zeitliche Skalen hinweg entstehenden Komplexität ist zur Analyse von Klimafolgen ein systemischer Ansatz von Nöten. Vulnerabilität beschreibt, in welchem Umfang ein exponiertes System anfällig gegenüber Störungen oder Stress ist und wie eingeschränkt das System ist, mit diesen Herausforderungen umzugehen bzw. diese zu bewältigen. Sie ist daher ein Maß, das die Empfindlichkeit des Mensch-Umwelt-Systems gegenüber den negativen Effekten des Klimawandels aufzeigt, bzw. beschreibt dessen (fehlende) Fähigkeit, die durch den Klimawandel hervorgerufenen Veränderungen zu bewältigen. Dieser Vulnerabilität wirkt die Resilienz entgegen, welche die Selbsthilfefähigkeit eines Individuums, einer Gesellschaft oder eines

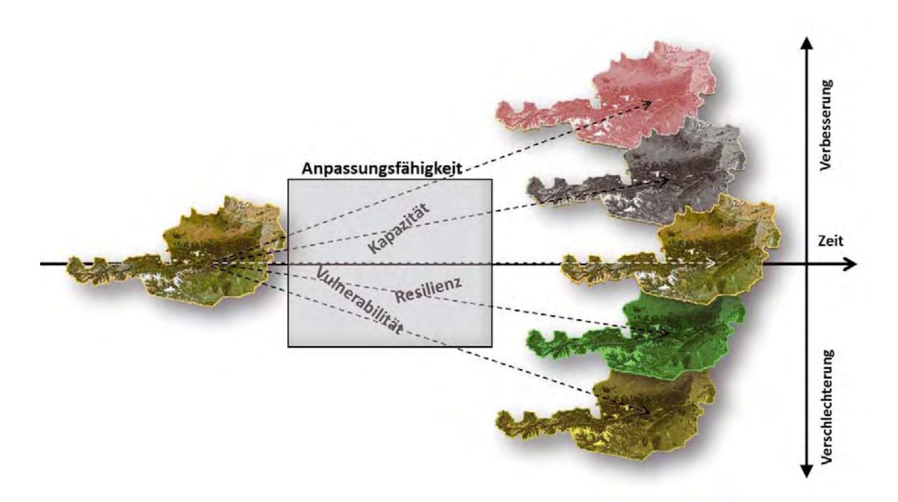


Abbildung S.2.2. Offenes Konzept zur Anpassungsfähigkeit, basierend auf einem offenen Risikokonzept. Mögliche zukünftige Zustände in Österreich sind eine Funktion der Anpassungsfähigkeit. Quelle: Coy und Stötter (2013)

Figure S.2.2. Open concept of adaptability, based on the open risk concept. Possible future conditions that may exist in Austria are a function of its adaptability; Source: Coy and Stötter (2013)

Systems zum Ausdruck bringt, einem ungünstigen Einfluss zu widerstehen, bzw. ihn zu überwinden. Resilienz basiert ursprünglich auf Überlegungen zur Fähigkeit von Ökosystemen, Störungen widerstehen zu können ohne die Struktur zu verändern bzw. gar zusammenzubrechen. In jüngerer Vergangenheit wurde das Konzept der Resilienz auch auf soziale Systeme übertragen. Dabei steht die Fähigkeit von Individuen oder sozialen Gruppen im Mittelpunkt, externe Stressfaktoren und Störungen infolge ökologischer, sozialer oder auch politischer Einflüsse ausgleichen sowie zukunftsorientiert planen zu können. Aufgrund des Wesens dieser beiden Konzepte werden damit in der Regel nur potentiell negative Veränderungen des Systems beschrieben, wogegen durchaus mögliche positive Entwicklungen, hin zu einem verbesserten Systemzustand, unberücksichtigt bleiben. Daher wird oft zusätzlich die Kapazität eines Systems beschrieben, welche als „Aufnahmefähigkeit“ verstanden wird, die es erlaubt einen spezifischen Impuls auch in Richtung eines verbesserten Systemzustands aufzugreifen und weiter zu entwickeln. Dabei geht es um den Aufbau von Kapazität (capacity building), die dann im Sinne einer Anpassungskapazität (adaptive capacity) zur Anpassung an veränderte Rahmenbedingungen beitragen kann (Band 2, Kapitel 1).

Anpassung an den Klimawandel ist notwendig, um negative Auswirkungen abzufedern bzw. abzuwenden und um Brüche im System zu vermeiden. Trotz aller Anstrengungen, eine weitere Verstärkung des menschlich verursachten Treibhauseffekts zu vermeiden, ist der Klimawandel im 21. Jahrhundert unvermeidbar, einzig sein Ausmaß ist noch offen. Anpassung ist daher ein (über-)lebenswichtiges Handlungsprinzip, das dazu beitragen kann, Brüche oder einen Kollaps des Mensch-Umwelt-Systems zu vermeiden. Anpassungsaktivitäten sind zielorientiert und bezwecken entweder eine Reduktion von Risiken oder eine Realisierung von positiven Entwicklungspotentialen. Minderung und Anpassung (Band 3, Kapitel 1) des Klimawandels sind eng miteinander verbunden – es besteht umso größerer Anpassungsbedarf je weniger die Anstrengungen der Mitigation greifen. Die Anpassungsfähigkeit eines Systems hängt zum einen von der Vulnerabilität, Resilienz und Kapazität und zum anderen von der Intensität des Klimawandels ab (Abbildung S.2.2). Die Anpassungsfähigkeit eines Systems muss dabei generell in mittel- bis langfristigen Zeiträumen betrachtet werden und besitzt somit, vergleichbar dem Prinzip der Nachhaltigkeit, eine generationenübergreifende Dimension (Band 2, Kapitel 1).

Das Konzept der **Ökosystemleistungen** erlaubt es, die ökologischen Folgen des Klimawandels und deren Auswirkungen auf die Gesellschaft quantitativ zu bewerten. Das Konzept der Ökosystemleistungen – eingeführt vom Millennium Ecosystem Assessment – quantifiziert die von der Natur erbrachten und vom Menschen genutzten Leistungen von Ökosystemen. Dabei werden vier Kategorien von Ökosystemleistungen unterschieden: (1) Versorgungsleistungen: Produkte, die direkt aus Ökosystemen entnommen werden (z. B. Nahrungs- und Futtermittel, Trinkwasser, Holz, Brennstoffe, pflanzliche Arzneistoffe), (2) Regulierungsleistungen: wie die Regulierung von Klima und Luftqualität, Abschwächung von Extremereignissen und biologische Schädlingsbekämpfung, (3) kulturelle Leistungen: wie Erholung, Erleben und Bildung in der Natur, spirituelle und ästhetische Werte sowie (4) Unterstützungsleistungen: Leistungen von Ökosystemen, die notwendig sind, um die Leistungen der übrigen drei Kategorien bereitzustellen (z. B. Photosynthese, Stoffkreisläufe und Bodenbildung). Da Ökosysteme sensitiv auf Klimaänderungen reagieren, und die Leistungen, die Menschen aus Ökosystemen beziehen, von diesen Änderungen betroffen sind, sind Ökosystemleistungen gut geeignet, um Folgeerscheinungen des Klimawandels auf das Mensch-Umwelt-System zu bewerten. Darüber hinaus bietet das (langfristige) Monitoring von Ökosystemleistun-

gen die Möglichkeit, auch die teilweise schwierig zu fassenden indirekten Wirkungen des Klimawandels zu quantifizieren (Band 2, Kapitel 1; Band 2, Kapitel 3).

S.2.2 Auswirkungen auf den Wasserkreislauf
S.2.2 Impacts on the Hydrological Cycle

Schnee: Die Schneefallgrenze ist seit 1980 gestiegen, wobei der Anstieg vor allem in den Sommermonaten ausgeprägt ist. Für den Winter ist nur ein im Vergleich zur Variabilität geringer Anstieg zu beobachten. Diese Entwicklung deckt sich weitgehend mit der wesentlich stärkeren Zunahme der Lufttemperatur im Sommer verglichen mit dem Winter (Band 1, Kapitel 3; Band 2, Kapitel 2).

Aufgrund des Temperaturanstieges ist für den Alpenraum mit einem Anstieg der Schneefallgrenze um 300 bis 600 m bis zum Ende des Jahrhunderts beziehungsweise um etwa 120 m pro 1 °C Erwärmung zu rechnen.

Die Dauer der Schneebedeckung hat sich in den letzten Jahrzehnten vor allem in mittelhohen Lagen (um 1000 m Seehöhe) verkürzt. Da sowohl die Schneefallgrenze und damit der Schneedeckenzuwachs, als auch die Schneeschmelze temperaturabhängig sind, ist durch den weiteren Temperaturanstieg eine Abnahme der Schneedeckenhöhen in mittelhohen Lagen zu erwarten (sehr wahrscheinlich, Band 2, Kapitel 2). Für die Höhenstufe von 1 000 bis 2 000 m ergibt sich aus Modellberechnungen eine Abnahme der Schneedeckendauer um im Mittel 30 Tage. In Tieflagen (<1 000 m) und Hochlagen (>2 000 m) wird diese Abnahme nur etwa 15 Tage betragen. Der Süden und Südosten Österreichs ist mit ca. 70 Tagen im Mittel besonders von der für die Zukunft prognostizierten Abnahme der Schneedeckendauer betroffen. Eine mit der heutigen Situation vergleichbare Schneebedeckung wird bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts erst in etwa 200 Höhenmetern bergwärts verschobenen Lagen auftreten (Band 2, Kapitel 2).

In tiefen und mittleren Lagen wird klimabedingt ein Rückgang der Lawinentätigkeit erwartet. Der rückläufige Anteil des festen Niederschlags in tiefen bis mittleren Lagen führt zu geringeren Neuschneemengen, was wiederum die Lawinentätigkeit verringert. In höheren Lagen könnten die Neuschneemengen jedoch zunehmen, wobei temperaturbedingt eine Verschiebung von Staub- zu Nassschneelawinen zu erwarten ist. In Hinblick auf eine geänderte Lawinenaktivität muss auch eine Veränderung des Waldes mit einbezogen werden (Band 2, Kapitel 3), wobei eine steigende Bestockungsdichte in Hochlagen sich dämpfend auf die Lawinenaktivität auswirken könnte (Band 2, Kapitel 4).

Gletscher: Alle vermessenen Gletscher Österreichs haben im Zeitraum seit 1980 deutlich an Fläche und Volumen verloren. So hat z. B. in den südlichen Ötztaler Alpen, dem größten zusammenhängenden Gletschergebiet Österreichs, die Gletscherfläche von 144,2 km² im Jahre 1969 auf 126,6 km² im Jahre 1997 und 116,1 km² im Jahre 2006 abgenommen (Band 2, Kapitel 2). Zwischen 1969 und 1998 haben Österreichs Gletscher in Summe etwa 16,6 % ihrer Fläche eingebüßt (Band 2, Kapitel 2).

Die österreichischen Gletscher reagieren in der Rückzugsphase seit 1980 besonders sensitiv auf die Sommertemperatur, daher wird erwartet, dass **bis zum Jahr 2030 das Eisvolumen und die Fläche der österreichischen Gletscher auf die Hälfte der Mittelwerte der Periode 1985 bis 2004 gesunken sein wird.** Für den zukünftigen Massenverlust der Gletscher spielt das gewählte Klimaszenario eine relativ geringe Rolle, da ein substantieller Teil des zukünftigen Massenverlustes eine (verzögerte) Folge der bereits vergangenen Klimaänderung darstellt. Im günstigsten Szenario stabilisieren sich die österreichischen Gletscher gegen Ende des 21. Jahrhunderts bei etwa 20 % des momentanen Eisvolumens, wogegen das Extremszenario praktisch zum gänzlichen Abschmelzen der Gletscher in Österreich führt (Band 2, Kapitel 2). Bei Blockgletschern führt ein Temperaturanstieg nicht nur zu einer Vergrößerung der sommerlichen Auftauschicht, sondern auch zu einer Bewegungsbeschleunigung (Band 2, Kapitel 4).

Abfluss: Der Jahresabfluss in Österreichs Fließgewässern wird durch die temperaturbedingt steigende Verdunstung tendenziell abnehmen. Regional ist von einer stärkeren Abnahme des Jahresabflusses im Süden Österreichs auszugehen. Österreichweite Prognosen für die Abflussabnahme liegen zwischen 3 und 6 % bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts und zwischen 8 und 12 % bis zum Ende des Jahrhunderts und variieren in Abhängigkeit des gewählten Klimaszenarios und des jeweiligen Prognosemodells. Inwieweit diese Abnahmen künftig durch Änderungen im Niederschlag kompensiert oder verstärkt werden, ist wegen der großen Unsicherheiten noch nicht zu sagen (Band 2, Kapitel 2).

Eine klimabedingte Verschiebung in der saisonalen Abflusscharakteristik in Österreichs Fließgewässern ist sehr wahrscheinlich. Winterniederwässer im Alpenraum werden durch eine erhöhte Wintertemperatur und eine früher eintretende Schneeschmelze tendenziell erhöht. Für Sommerabflüsse wird eine leicht fallende Tendenz erwartet, die im Süden deutlicher ausgeprägt sein dürfte (Band 2, Kapitel 2).

Die maximalen jährlichen Hochwasserdurchflüsse haben in den letzten 30 Jahren in rund 20 % der Einzugsgebiete zugenommen. Besonders davon betroffen sind kleine

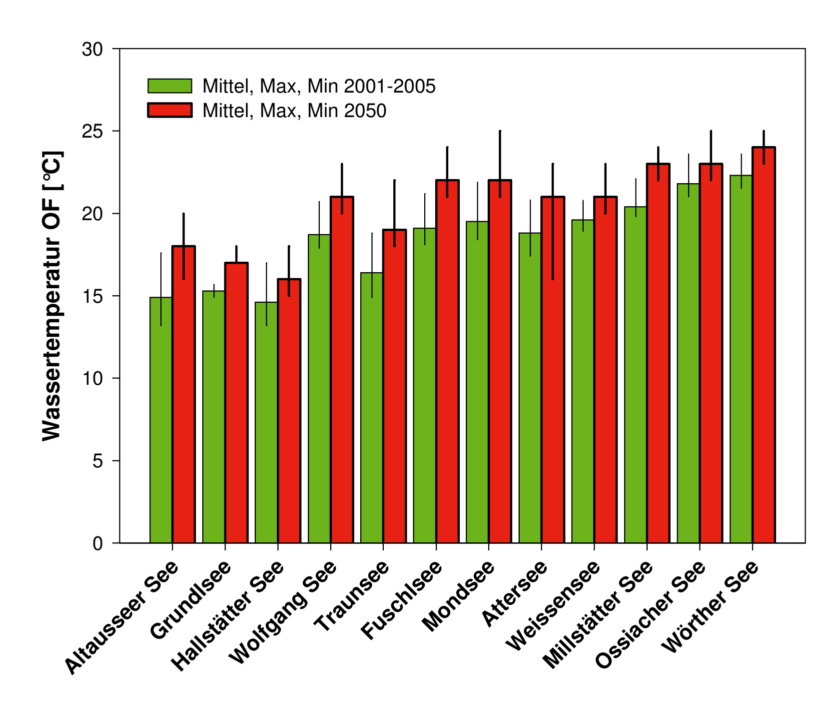


Abbildung S.2.3. Beobachtete (grün) und für 2050 erwartete (rot) Oberflächenwassertemperaturen (OF) ausgewählter Seen in Österreich während der Badesaison (Juni bis September). Die Säulen geben die mittleren Temperaturen wieder, die Striche erstrecken sich jeweils vom Minimum zum Maximum. Die erwarteten Werte sind mittels linearer Extrapolation berechnet. Quelle: Dokulil (2009)

Figure S.2.3. Observed (green) and estimated (red) surface water temperatures (OF) in lakes for 2050 during the bathing season (June to September). The columns indicate the mean, the lines the maximum and minimum values between 2001 and 2005; the estimates for 2050 are based on a linear trend. Source: Dokulil (2009)

Einzugsgebiete nördlich des Alpenhauptkammes. Österreichweit haben Winterhochwässer deutlich stärker zugenommen als Sommerhochwässer. Ein Einfluss des Klimawandels kann derzeit nicht belegt werden, denn die Häufung der Hochwässer in den letzten Jahrzehnten liegt noch im Rahmen der natürlichen Variabilität. Für die Zukunft wird eine Verschiebung des Hochwasserzeitpunktes in Richtung früher Frühjahrshochwässer und mehr Winterhochwässer insbesondere im Norden Österreichs erwartet (Band 2, Kapitel 2). Das Schadenspotenzial durch Starkniederschläge in Siedlungsräumen wird – insbesondere auch wegen zu gering dimensionierter Kanalnetze, welche das Niederschlagsvolumen nicht mehr aufnehmen und ableiten können – als hoch eingeschätzt (Band 2, Kapitel 6). Gut abgesicherte Prognosen über zukünftige Änderungen von Hochwässern sind jedoch aufgrund der unsicheren Entwicklung klimatischer Extreme (v. a. Starkniederschläge) noch nicht möglich (Band 2, Kapitel 2).

Die **Gewässertemperaturen** sind in den letzten Jahrzehnten sowohl in Seen als auch Fließgewässern angestiegen und weitere Anstiege werden erwartet. In der Periode 2001 bis 2005 lagen die Seentemperaturen während der Badesaison (Juni bis September) um 0,9 °C (Einzugsgebiet der Traun), 1,3 °C (Kärntner Seen), und 1,7 °C (Einzugsgebiet der Ager) höher als in der Periode 1960 bis 1989. In den Fließgewässern betrug der Anstieg seit den 1980er Jahren im Mittel über alle Messstellen 1,5 °C im Sommer und 0,7 °C im Winter (Band 2, Kapitel 2). Für die Zukunft wird ein weiterer Anstieg der Gewässertemperaturen erwartet, wobei Seen stärker betroffen sein werden als Fließgewässer. Bis zur Mitte des Jahrhunderts werden für die Badesaison durchschnittliche Zunahmen zwischen 1,2 und 2,1 °C in den Kärntner Seen und 2,2 bis 2,6 °C für die meisten Salzkammergutseen erwartet (Abbildung S.2.3). Für Fließgewässer wird bis 2050 ein Anstieg zwischen 0,7 und 1,1 °C im Sommer sowie um 0,4 bis 0,5 °C im Winter erwartet (Band 2, Kapitel 2).

Grundwasser, Bodenfeuchte: Für das Grundwasser wurde in den meisten Gebieten Österreichs ein Absinken seit den 1960er Jahren und ein deutlicher Anstieg seit Mitte der 1990er Jahre festgestellt. Diese Schwankungen sind weitgehend auf natürliche Klimavariabilität sowie regionale Grundwassernutzungsänderungen zurückzuführen. Zwischen 1976 und 2008 wurde bei 24% der Messstellen eine fallende Tendenz in den Jahresmittelwerten des Grundwasserstandes festgestellt, während 10% einen steigenden Trend über denselben Zeitraum zeigten (Band 2, Kapitel 2).

Der mittlere Bodenfeuchtegehalt sowie die Grundwasserneubildung werden in Zukunft moderat abnehmen. Während für die mittlere Bodenfeuchte in der Vegetationsperiode bis 2050 nur von geringen Änderungen ausgegangen wird, wird für die Periode 2051 bis 2080 eine leichte Abnahme in den Monaten März bis August erwartet. Auch für die Grundwasserneubildung sind bis zur Mitte des Jahrhunderts keine großräumigen Veränderungen zu erwarten. In der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts ergeben sich je nach unterstelltem Klimaszenario unterschiedliche Ergebnisse, wobei vor allem in außeralpinen Gebieten Änderungen in der Grundwasserneubildung von +5 % bis zu −30 % prognostiziert werden, und vor allem im Süden und Süd-

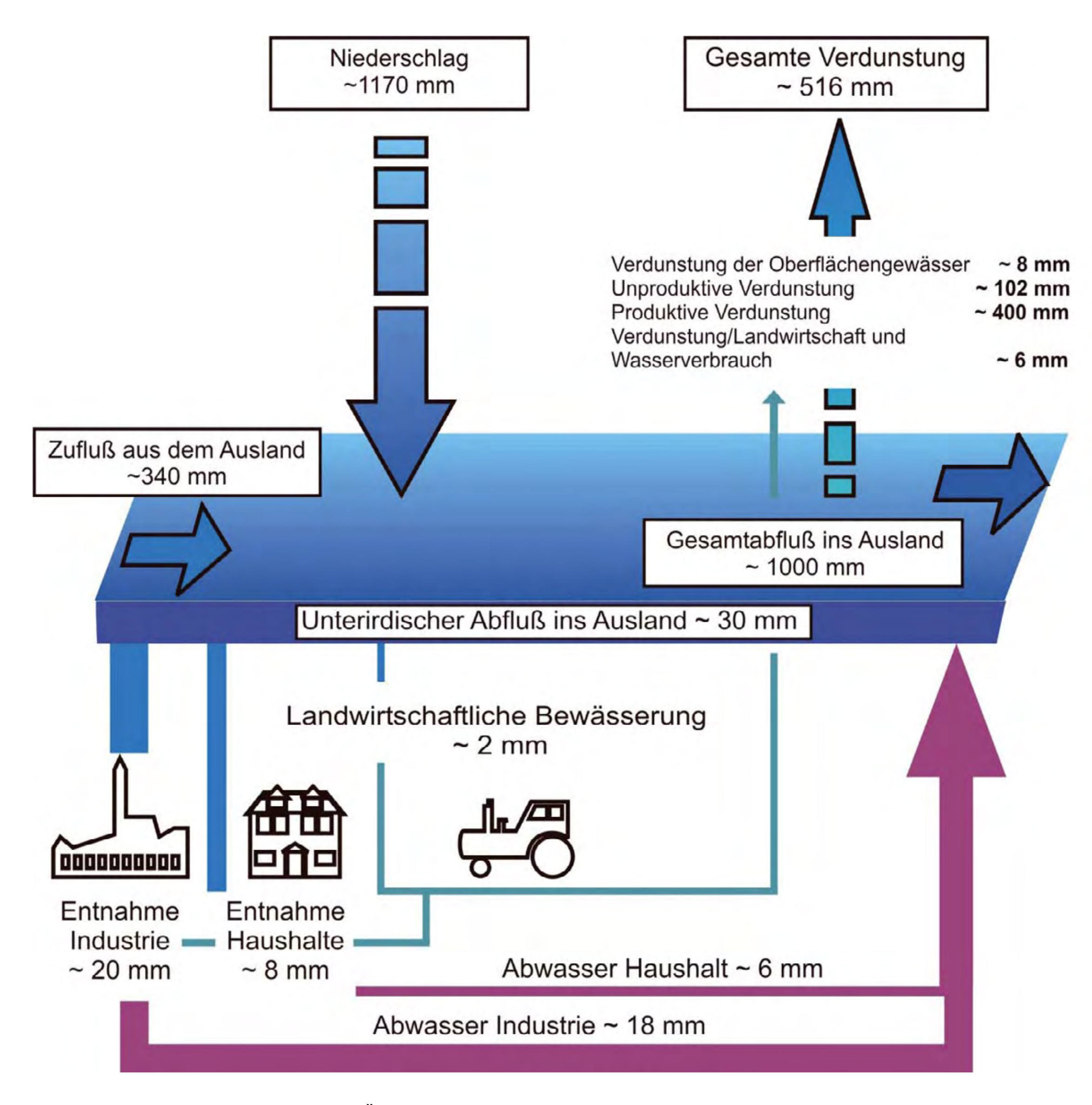


Abbildung S.2.4. Mittelwerte der Wasserbilanz Österreichs für den Zeitraum 1960 bis 2000. Quelle: Hydrographisches Zentralbüro, BMLFUW, Abteilung IV/4-Wasserhaushalt

Figure S.2.4. Average values of the water balance for Austria during the period 1960 to 2000. Source: Central Hydrographical Buro, Austrian Federal Ministry of Agriculture, Forestry, Environement and Watermanagement, Dep. IV/4 Water Balance

osten Österreichs mit Abnahmen zu rechnen ist (Band 2, Kapitel 2).

Wasserbilanz: Die Wasserbilanz Österreichs zeichnet sich aktuell durch ein hohes Wasserangebot im Vergleich zur Wassernutzung aus. Für die Referenzperiode 1961 bis 1990 stehen einem mittleren Jahresniederschlag von 1 140 bis 1 170 mm (mm = Liter pro Quadratmeter) ein industrieller Verbrauch von 20 mm, eine häusliche Nutzung von 8 mm sowie ein landwirtschaftlicher Beregnungsbedarf von 2 mm gegenüber (Abbildung S.2.4). Für die Zukunft wird erwartet, dass die Verdunstung (derzeit 500–520 mm) zunehmen und der Abfluss (derzeit 650–690 mm) leicht abnehmen wird. Aus wasserwirtschaftlicher Sicht besteht bis Mitte des 21. Jahrhunderts grundsätzlich nur geringer Handlungsbedarf, wobei jedoch für Gebiete mit bereits heute geringerem Wasserdargebot (v. a. im Osten und Süden Österreichs) Anpassungsbedarf gegeben ist (Band 2, Kapitel 2).

Im häuslichen Wasserbedarf zeigt sich seit Jahrzehnten ein leicht rückläufiger Trend, der sich auch in Zukunft fortsetzen wird. Der Grund für diesen rückläufigen Trend liegt in der effizienteren Wassernutzung in Haushalten und Gewerbebetrieben sowie in rückläufigen Rohrnetzverlusten. Während der durchschnittliche Haushaltswasserverbrauch in Österreich im Jahr 2011 bei 135 Liter pro EinwohnerIn und Tag lag wird der

spezifische Verbrauch bis 2050 auf ca. 120 Liter pro EinwohnerIn und Tag sinken (Band 2, Kapitel 2).

Der landwirtschaftliche Wasserbedarf wird in Österreich zum überwiegenden Teil durch den Niederschlag abgedeckt. Im Osten und teilweise auch im Südosten Österreichs ist aber schon aktuell die Bereitstellung von Wasser zur Bewässerung erforderlich, wozu Grundwässer und in geringerem Umfang auch Oberflächenwässer genutzt werden. Infolge erhöhter Temperaturen steigt zukünftig der Wasserbedarf der landwirtschaftlichen Nutzpflanzen, sodass vor allem im **Osten und Südosten der Bewässerungsbedarf längerfristig zunehmen wird** (Band 2, Kapitel 2). Bei zunehmender Bewässerung ist eine Versalzung des Bodens möglich (Band 2, Kapitel 5).

S.2.3 Auswirkungen auf Relief und Böden
S.2.3 Impacts on Topography and Soil

Das Relief ist durch langfristig wirkende geomorphologische Kräfte bestimmt, welche jedoch von kurzfristig agierenden Kräften wie Klimafaktoren überlagert werden. Während beispielsweise die großen alpinen Täler besonders durch die Eiszeiten der letzten 400 000 Jahre geprägt sind, finden in diesen Tälern ganz aktuell viele reliefformende Prozesse statt (z. B. Rutschungen), die durch die aktuell und zukünftig wirkenden Klimafaktoren (vor allem Temperatur, Strahlung und Niederschlag) maßgeblich beeinflusst werden (Band 2, Kapitel 4).

Die natürlichen reliefformenden Prozesse in Österreich sind stark durch menschliche Aktivität überprägt. Die Gesellschaft verändert die natürliche Frequenz und Magnitude von geomorphologischen Prozessen wie beispielsweise Muren und Hangrutschungen. Weiters gestaltet und modifiziert sie direkt die materielle Umwelt und verändert somit die Prozessabläufe in der Reliefsphäre (z. B. durch den Bau von Infrastruktur oder die Ausweitung von Nutzungsräumen). Die Gesellschaft steuert aber auch Prozesse der Reliefsphäre (z. B. durch Flussverbauungen und Vegetationsänderungen) und kann sogar als deren Auslöser auftreten (z. B. Überschwemmung durch Fehlfunktion von Schutzbauten). Klimabedingte Änderungen in geomorphologischen Prozessen sowie der Reliefsphäre wirken daher zeitgleich mit gesellschaftlichen Einflüssen. Die Einflussfaktoren Mensch und Klima wirken manchmal verstärkend, manchmal vermindernd und häufig zeitversetzt (Band 2, Kapitel 4; Band 2, Kapitel 1).

Bei zunehmenden Starkniederschlägen, langanhaltenden Niederschlagsereignissen sowie Warmlufteinbrüchen bei vorhandener Schneedecke kann die Rutschungsgefährdung zunehmen. Hierbei ist jedoch die jeweilige Landbedeckung (z. B. Wald, Ackerfläche, Grasland) von besonderer Bedeutung. Menschlichen Eingriffen (z. B. Landnutzungsänderungen) wird generell ein größerer Einfluss auf zukünftige Rutschungsereignisse zugemessen als dem Klimawandel. Generell besteht noch hohe Unsicherheit in Bezug auf die zukünftige Entwicklung von Rutschungen (Band 2, Kapitel 4; Band 2, Kapitel 5).

Es wird vermutet, dass Muren in ihrer Häufigkeit und Magnitude in Zukunft zunehmen werden. Vor allem eine lokale Zunahme von Wärmegewittern oder lang anhaltenden Niederschlagsereignissen könnte in Zukunft zu einem Ansteigen der Murentätigkeit führen. Weiters führen das klimabedingte Schwinden von Permafrost sowie der Rückgang von Gletschern (Band 2, Kapitel 2) durch die Freilegung von nicht gefestigtem Material zu einem Anstieg der Gefährdung durch Muren (Band 2, Kapitel 4).

In den von Permafrost beeinflussten Hochlagen wird der Klimawandel zu einer verstärkten Steinschlag- und Felssturztätigkeit führen. Für die größten Teile der Landesfläche, jene die Permafrost frei sind, ist jedoch eine kaum veränderte Aktivität zu vermuten. Generell konnte in Österreich in bisherigen warmen Perioden eine Verschiebung des Maximums der Felssturztätigkeit vom Frühjahr in den Sommer beobachtet werden. Tiefergründige Hangverformungen wie z. B. Bergstürze und Felsgleitungen zeigen in bisherigen Beobachtungen keinen eindeutigen Einfluss des Klimas (Band 2, Kapitel 4).

In Österreich muss etwa oberhalb einer Seehöhe von 2 500 m mit dem Auftreten von Permafrost gerechnet werden, was etwa 2 % der Staatsfläche (1 600 km²) entspricht. **Eine Temperaturerhöhung um 1 °C kann einen Anstieg der Permafrostgrenze um ca. 200 m bewirken** (Band 2, Kapitel 4). Die Permafrostkörper in den österreichischen Alpen werden daher aufgrund der erwarteten Erwärmung zurückgehen und bedeutende Teile davon in Zukunft permafrostfrei werden (Band 2, Kapitel 2).

Solifluktion (Bodenfließen) ist eine langsame, hangabwärts gerichtete Fließbewegung des aufgetauten Oberbodens über noch gefrorenem Untergrund (Band 2, Kapitel 4). Die zunehmende Erwärmung im Alpenraum wird infolge des Rückzuges des Permafrostes in größere Tiefen zu einer Abschwächung der Bodenbewegung durch Solifluktion führen.

Durch den Gletscherrückgang (Band 2, Kapitel 2) **werden auf den freigelegten Flächen Erosion und Sedimenteintrag in Fließgewässern zunehmen.** Eine direkte Folge der Gletschererosion ist der hohe Feinsedimenteintrag in Fließgewässern und Seen, was bei letzteren zur Verlandung führen kann. Einerseits kann der Rückzug von Gletschern oder das Auftauen von Permafrost lokal zu einer deutlichen Erhöhung des Geschiebepotenzials und damit des Feststofftransports in

Tabelle S.2.1 Abschätzung der Sensitivität von Prozessen im Boden in Bezug auf den Klimawandel. Erstellt von Geitner für AAR14
Table S.2.1 Assessment of the sensitivity of processes in soils related to climate change. Developed by Geitner for AAR14

Prozesse	Sensitivität	Erläuterungen
Mineralkörper		
Physikalische Verwitterung	++	A oder Z: abhängig von Höhenstufe (Frostwechselhäufigkeit)
Chemische Verwitterung	++	Z: bei Erhöhung der Temperatur (nivale/alpine Stufe) A: bei trockenen Verhältnissen
Biologische Verwitterung	+	A oder Z: bei Vegetationsänderungen
Oxidation	+	Z: bei trockenen Verhältnissen
Reduktion	+	Z: bei feuchten Verhältnissen
Tonmineralbildung	+	A: bei trockenen Verhältnissen
Tonverlagerung	+	A: bei trockenen Verhältnissen
Podsolierung	+	A: bei trockenen Verhältnissen
Carbonatisierung	+	Z: bei trockenen, wechselfeuchten Verhältnissen A: bei feuchten Verhältnissen
Humuskörper		
Mineralisation	+++	Z: bei durchschnittlichen Bedingungen A: bei trockenen oder bei sehr feuchten Verhältnissen
Humifizierung	+	A oder Z: in Abhängigkeit von weiteren Faktoren (z. B. Feuchtigkeit, chemische Zusammensetzung der Streu)
Sonstige		
Austauschprozesse (Ionen)	+	A: bei trockenen Verhältnissen
Aggregatbildung	+	in Abhängigkeit von sonstigen Bedingungen
Bioturbation	++	in Abhängigkeit von sonstigen Bedingungen
Kryoturbation	++	in Abhängigkeit von Dauer der Frostphasen und Anzahl der Frostwechsel, unterschiedlich nach Höhenlage

A = Abnahme, Z = Zunahme, + = mäßige, ++ = mittlere, +++ = starke Wirkung erwartet

Fließgewässern führen. Andererseits muss bei einem vollständigen Verschwinden lokaler Gletscher mittelfristig von einer Abnahme des Feinsedimenteintrages in Gewässern ausgegangen werden. Weiters ist zu beachten, dass der Geschiebetransport in Fließgewässern stark durch menschliche Einflüsse wie Flussregulierungen und Kraftwerksbauten überprägt ist (Band 2, Kapitel 4).

Sollten sich Windgeschwindigkeiten lokal erhöhen, kann auch die Winderosion in Zukunft zunehmen. Diese ist jedoch ebenfalls stark von der Vegetation(-sänderung) und landwirtschaftlichen Nutzung abhängig (Band 2, Kapitel 4; Band 2, Kapitel 5).

Ökosystemleistungen werden durch etwaige klimabedingte Änderungen im Relief nur geringfügig beeinflusst. Da geologische Prozesse auf ein sich änderndes Klima langsamer reagieren als ökologische Prozesse (Band 2, Kapitel 3), werden erstere für die Bereitstellung von Ökosystemleistungen (Band 2, Kapitel 1) in Österreich während der nächsten Jahrzehnten nur von untergeordneter Bedeutung sein (Band 2, Kapitel 4).

Was den Boden betrifft, sind die deutlichsten Klimaeffekte auf das Bodenleben und den dadurch beeinflussten Humushaushalt zu erwarten. Als Boden wird der oberste, von der Verwitterung beeinflusste Teil (und somit die mit der Atmosphäre in direktem Austausch stehenden obersten Dezimeter) der Erdkruste bezeichnet. Viele Prozesse im Boden sind sowohl temperatur- als auch feuchtigkeitsabhängig – deren zukünftige Entwicklung hängt somit von den lokalen Änderungen in Temperatur *und* Niederschlag ab. Besonders betroffen sind dabei das Bodenleben und die Prozesse des Humusabbaus, der Nährstoffnachlieferung sowie eine mögliche Veränderungen der Bodenstruktur (Tabelle S.2.1). Trockene Böden weisen generell eine geringere Diversität des Bodenlebens und weniger robuste Populationen auf als feuchtere, gut sauerstoffversorgte Böden (Band 2, Kapitel 5).

Generell reagieren Böden träge auf klimatische Änderungen. Da die Vegetation wesentlich rascher auf Klimaveränderungen reagiert (Band 2, Kapitel 3) und ihrerseits die Bodenentwicklung – vor allem die Bildung der organischen Substanz

im Boden – mitbestimmt, ist kurz- und mittelfristig von indirekten Klimaeffekten auszugehen (Band 2, Kapitel 1), die auf den Böden überwiegen werden (Band 2, Kapitel 5).

Böden beeinflussen die Kohlenstoffbilanz und sind somit direkt klimawirksam. Die Menge an CO_2, die jährlich aus den Böden in die Atmosphäre gelangt (und in etwa in gleichem Maße wieder vom Boden aufgenommen wird), übersteigt die durch fossile Brennstoffe verursachten Emissionen deutlich. Die Erhaltung des ökologischen Gleichgewichts der Böden ist somit ein wichtiger Aspekt des Klimaschutzes. Höhere Temperaturen verstärkten die Mineralisation und können daher zu einer Abnahme der organischen Substanz im Boden (und somit auch des im Boden gespeicherten Kohlenstoffs) führen. Dies setzt allerdings gleichbleibende Feuchtigkeitsbedingungen voraus. Trockenperioden verzögern den Humusabbau, ebenso ein Durchfrieren des Bodens bei geringer Schneelage (Tabelle S.2.1). Ob und inwieweit die durch steigende Temperaturen erwarteten Humusverluste durch eine erhöhte Biomasseproduktion der Vegetation (z. B. durch erhöhtes CO_2-Angebot und längere Vegetationszeiten, Band 2, Kapitel 3) ausgeglichen werden können, ist von Standort und Bewirtschaftung abhängig und noch mit großen Unsicherheiten behaftet. Auch bezüglich der Stabilität von Humuskomplexen und der Rolle des Unterbodens in der Kohlenstoffspeicherung besteht noch Forschungsbedarf (Band 2, Kapitel 5).

Temperaturextreme und Trockenphasen haben größere Auswirkungen auf Bodenprozesse als graduelle klimatische Änderungen. Temperaturextreme beeinflussen z. B. Bodenlebewesen stärker als graduelle Veränderungen der durchschnittlichen Temperatur. Weiters beeinflussen Temperaturextreme und Trockenphasen die Umsatzraten von Kohlenstoff und Stickstoff im Boden stark. Bei stärker ausgeprägten Gefrier- und Auftauprozessen im Winter (durch Veränderung der Dauer und Mächtigkeit der Schneebedeckung), aber auch bei starkem und langem Austrocknen des Bodens, gefolgt von Starkniederschlagsereignissen, steigen die Umsetzungsraten von Kohlenstoff und Stickstoff, wodurch es unmittelbar nach derartigen Ereignissen zu Spitzen in der THG-Emission kommt (Band 2, Kapitel 5).

Durch einen lokal möglichen Rückgang von Sickerwasser und Grundwasserspiegel unter trockeneren Bedingungen (Band 2, Kapitel 2) kann auf wasserbeeinflussten Böden (Gley, Pseudogley) der Stauwassereinfluss reduziert und somit die Ertragsleistung erhöht werden. Derartige Änderungen können jedoch auch die natürliche Dynamik von Au- und Moorböden beeinträchtigen. Insbesondere Moorböden, die einen bedeutenden Kohlenstoffspeicher darstellen, reagieren empfindlich auf steigende Temperaturen und Austrocknung (Band 2, Kapitel 5).

Ackerböden sind stärker von der Zunahme klimatischer Extreme betroffen als Grünlandböden. Bei Ackerböden kann insbesondere in Phasen unvollständiger oder fehlender Bodenbedeckung die Erosion durch Wasser und Wind zunehmen (Band 2, Kapitel 4; Band 2, Kapitel 5). Anbau- und Bodenmanagement werden daher zukünftig an Bedeutung gewinnen, um mögliche klimabedingte Probleme durch angepasste Bewirtschaftung zu kompensieren. Für Grünlandböden ist generell von hoher Stabilität auszugehen, wobei auch hier eine klimabedingte Reduktion des Humusgehaltes möglich ist (Band 2, Kapitel 5). Im Lichte von globalen Fragen der Ernährungssicherheit bei gleichzeitig steigenden Nutzungsansprüchen an Böden (z. B. durch die vermehrte Nutzung von Bioenergie) könnte eine Steigerung der Stickstoffnutzungseffizienz in Böden einen Beitrag leisten (Band 2, Kapitel 5). **Naturnahe Böden werden ihre Funktionen und Leistungen auch unter veränderten klimatischen Bedingungen besser erfüllen als stark menschlich beeinträchtigte Böden.** Bodenschutz ist daher nicht nur Klimaschutz, sondern auch ein wichtiger Beitrag zur Klimaanpassung.

Steigende Temperaturen führen zu erhöhten CO_2-Emissionen aus Waldböden. Bei einer Temperaturerhöhung um 1 °C wird in etwa 10 % mehr CO_2 durch Bodenatmung freigesetzt, bei einer Erwärmung um 2 °C werden rund 20 % mehr CO_2 und N_2O emittiert. Auch eine Zunahme von Störungen (z. B. durch Windwurfereignisse und nachfolgende Borkenkäferkalamitäten, Band 2, Kapitel 3) führt zu Humus- bzw. Bodenverlusten durch Erosion, zu einer erhöhten Freisetzung von CO_2 aus dem Boden sowie zu einer Beeinträchtigung der hydrologischen Bodenfunktionen (Band 2, Kapitel 5).

Über Auswirkungen des Klimawandels auf Hochgebirgsböden und Stadtböden ist noch wenig bekannt. Eine klimabedingte Veränderung der Vegetation – gerade im Bereich der aktuellen Waldgrenze (Band 2, Kapitel 3) – wird auch die Humusquantität und -qualität von Hochgebirgsböden beeinflussen. Andererseits werden höhere Temperaturen auch hier den Humusabbau begünstigen, zumal die Böden der Hochlagen leicht abbaubare Komponenten enthalten. Aufgrund der kleinräumigen Differenzierung der Gebirgsböden sind generelle Aussagen jedoch nur bedingt möglich (Band 2, Kapitel 5). Bei Stadtböden ist von einer starken Gefährdung durch den Klimawandel auszugehen, da sie durch die starke menschliche Beeinflussung schon *per se* einer erhöhten Temperatur sowie einem reduzierten Wassergehalt ausgesetzt sind und ein natürlicher Bodenaufbau oftmals fehlt. Detaillierte Studien zur Klimasensitivität von Stadtböden in Österreich fehlen jedoch (Band 2, Kapitel 5).

S.2.4 Auswirkungen auf die belebte Umwelt
S.2.4 Impacts on the Living Environment

In niederschlagsärmeren Gebieten nördlich der Donau sowie im Osten und Südosten Österreichs werden sich die landwirtschaftlichen Erträge verringern. In kühleren, niederschlagsreicheren Gebieten Österreichs steigert wärmeres Klima hingegen das Ertragspotenzial von landwirtschaftlichen Nutzpflanzen. Nicht bewässerte Sommerkulturen mit geringeren Temperaturansprüchen wie Sommergetreide, Zuckerrüben und Erdäpfeln werden zunehmend von Hitzestress und Trockenschäden betroffen sein. Das Ertragspotenzial dieser Kulturen wird stagnieren oder zurückgehen, insbesondere auf leichten Böden mit geringer Wasserspeicherkapazität (Band 2, Kapitel 3). Möglicherweise müssen bisher nicht bewässerte Kulturen regional zunehmend bewässert werden (Band 2, Kapitel 2; Band 2, Kapitel 3). Bei aktuell bereits bewässerten Kulturen ist ein zunehmender Wasserbedarf zu erwarten (Band 2, Kapitel 3).

Das klimatische Anbaupotenzial wärmeliebender Nutzpflanzen wie z. B. Körnermais oder Wein weitet sich in niederschlagsreicheren Gebieten deutlich aus. Wärmeliebende Sommerkulturen wie Mais, Sojabohnen oder Sonnenblumen können durch die zunehmenden Temperaturen auch im Ertragspotenzial profitieren, solange die Wasserversorgung nicht limitierend wirkt. Die auf nationaler Ebene beobachteten Ertragssteigerungen der vergangenen Jahrzehnte sind jedoch primär dem Fortschritt bei Agrartechnik, agro-chemischen Maßnahmen und der Pflanzenzüchtung – und somit nicht dem Klimawandel – zuzuschreiben. Für die Schweiz und Österreich zeigt sich neben steigenden Erträgen auch eine steigende zwischenjährliche Variabilität, welche zumindest zum Teil auf den Klimawandel zurückzuführen ist (Band 2, Kapitel 3).

Winterkulturen könnten ein ansteigendes Ertragspotential aufweisen, da sie die Winterfeuchte in den Böden besser ausnutzen. Allerdings besteht an nassen Standorten oder in niederschlagsreichen Regionen zunehmend auch die Gefahr von Staunässe durch zunehmende Niederschläge im Winterhalbjahr. Auch droht Winterkulturen (wie z. B. Winterweizen) bei wärmeren Wintern zunehmend Gefahr durch Schädlinge und Krankheiten (Band 2, Kapitel 3).

Ein weiterer Temperaturanstieg wird den Weinbau in bisher weniger geeigneten Klimalagen in Österreich begünstigen. In den bestehenden Weinanbaugebieten wird sich ein Temperaturanstieg besonders günstig auf Rotweinsorten bzw. die Rotweinqualität auswirken. Bei Weißweinsorten, für welche der Säuregehalt ein wesentliches Qualitätsmerkmal ist, könnte sich die Qualität in kühleren oder neuen Anbaugebieten verbessern, in bisherigen Anbaugebieten jedoch auch vermindern (Band 2, Kapitel 3).

Obstkulturen werden von den erwarteten klimatischen Änderungen negativ betroffen sein. Dabei sind insbesondere zunehmende Trockenheit und Bewässerungsbedürftigkeit problematisch, da Obstkulturen generell einen höheren Wasserbedarf haben und hitze-, bzw. trockenheitsempfindlicher sind als zum Beispiel der Wein. Auch eine Zunahme der Gewittertätigkeit bzw. der Heftigkeit von Gewittern könnte die Schadensgefahr insbesondere durch Hagel weiter steigen lassen. In Tal- und Beckenlagen ist eine Zunahme von Spätfrostschäden insbesondere während der Blüte zu erwarten. Zusätzlich können durch extreme Witterungsphasen Störungen im Wachstumsrhythmus eintreten. So können zum Beispiel warme Witterungsabschnitte im Winter zu einer Abnahme der Frosthärte der Obstgehölze führen und damit die nachfolgende Frostschadensgefahr erhöhen (Band 2, Kapitel 3).

Auch Nutztiere leiden unter dem Klimawandel. Zunehmende Hitzeperioden können bei Nutztieren die Leistung verringern und das Krankheitsrisiko erhöhen. Eine zunehmende Hitzebelastung kann z. B. zu einem Rückgang der Milchleistung bei Kühen oder zu einer Abnahme der Eigröße bei Legehennen führen. Neben der Umgebungstemperatur beeinflusst auch die Luftfeuchtigkeit und -strömung das thermische Wohlbefinden der Tiere (Band 2, Kapitel 3).

Klimabedingt wird die Produktivität österreichischer Wälder in Berglagen und Regionen mit ausreichendem Niederschlag zunehmen. In östlichen und nordöstlichen Tieflagen und in inneralpinen Beckenlagen nimmt die Produktivität hingegen aufgrund zunehmender Trockenperioden ab. Ob potentielle Zuwachssteigerungen in der praktischen Waldbewirtschaftung tatsächlich realisiert werden können, wird jedoch zu einem wesentlichen Teil von den zahlreichen Risikofaktoren und deren klimabedingten Änderungen abhängen (Band 2, Kapitel 3). So nimmt z. B. die Intensität und Häufigkeit von Störungen in Waldökosystemen unter allen diskutierten Klimaszenarien zu. Insbesondere gilt dies für das Auftreten wärmeliebender Insekten wie etwa Borkenkäfern. Zusätzlich ist mit neuartigen Schäden durch importierte oder aus südlicheren Regionen einwandernden Schadorganismen zu rechnen. Abiotische Störungsfaktoren wie etwa Stürme, Spät- und Frühfröste sowie Nassschneeereignisse könnten ebenfalls höhere Schäden als bisher verursachen. Diese Störungen können zudem Auslöser für Massenvermehrungen und Epidemien bedeutender forstlicher Schadorganismen wie etwa Borkenkäfern sein. Störungen führen einerseits zu geringeren Erlösen in der Holzproduktion (Band 2, Kapitel 3). Andererseits wird auch die Schutzfunktion der Wälder u. a.

vor Steinschlag, Muren und Lawinen oder auch ihre Fähigkeit zur Kohlenstoffspeicherung durch steigende Störungen beeinträchtigt (Band 2, Kapitel 3; Band 2, Kapitel 4).

Die trockenen Sommer der Jahre 2003 und 2007 haben gezeigt, dass auch in Österreich **Waldbrände** unter den entsprechenden Witterungsbedingungen rasch entstehen und erhebliche Ausmaße annehmen können. Aufgrund der erwarteten Erwärmung und der steigenden Wahrscheinlichkeit trockener Witterungsabschnitte im Sommer wird für die Zukunft eine größere Häufigkeit und Schwere von Waldbränden für den Alpenraum erwartet. Eine erhöhte Feuerfrequenz stellt insbesondere für den alpinen Raum ein Risiko dar, da dort die Regenerationszeit der Vegetation nach Waldbränden hoch ist und die Schutzfunktion des Waldes gegen Naturgefahren reduziert bzw. zunichte gemacht werden könnte (Band 2, Kapitel 4; Band 2, Kapitel 3).

Laubwaldgesellschaften werden in Österreichs Wald an Konkurrenzkraft gewinnen. In Österreich würde eine Erwärmung von 2 °C bei gleichzeitig geringfügig reduziertem Niederschlag auf knapp 80 % der Waldfläche zu einer Veränderung der potentiell natürlichen Waldgesellschaft führen, wobei vor allem Buchen-, aber auch Eichen- und Buchen-Tannen-Fichtenwaldtypen ihr potentielles Areal erhöhen würden. Regionale Unterschiede sowie die standörtliche Heterogenität im Gebirgswald führen in Verbindung mit der aktuellen Bestockung jedoch zu kleinräumigen Unterschieden in der zukünftigen Entwicklung des Österreichischen Waldes. Bis zu einem Schwellenwert der Temperaturerhöhung von in etwa +1 °C wird davon ausgegangen, dass keine größeren Arealänderungen von Waldgesellschaften in Österreich auftreten würden (Band 2, Kapitel 3).

In alpinen Lagen können kälteangepasste Pflanzen in größere Höhen vordringen, jedoch auch von wärmeliebenderen Arten verdrängt werden. Das Höhersteigen der Arten in alpinen Gipfelzonen ist ein europaweit nachweisbarer Prozess, der in Österreich zu einer Vermehrung der Artenvielfalt in höheren alpinen Lagen führen kann. Weiters ist ein Anstieg von wärmeliebenden Arten auf Kosten von kälteangepassten Arten in der alpinen Vegetation zu beobachten. Während letztere in Nischen trotz Erwärmung derzeit noch überdauern können, ist mittelfristig ein lokales Aussterben von kälteangepassten Arten der alpinen Vegetation zu erwarten. Aus dem Hochgebirge stammende Arten in den niedrigeren Randlagen der Alpen sind davon besonders betroffen (Band 2, Kapitel 3).

Hochmoore sind stark vom Klimawandel betroffen. Es wird geschätzt das 85 % der Hochmoore in Österreich durch einen Temperaturanstieg um 2–3 °C gefährdet sind (Band 2, Kapitel 3).

Österreichs Tierwelt wird durch den Klimawandel zunehmend mediterran geprägt. Dies lässt sich anhand von Artenverschiebungen bei verschiedenen Tiergruppen, wie z. B. den Libellen, Wanzen oder wirbellosen Süßwassertieren, bereits nachweisen. Gleichzeitig werden klimabedingte Arealverluste für viele Tierarten und Artengruppen erwartet, unter anderem für viele endemische (d. h. sonst nirgendwo vorkommende) Arten. Arealverschiebungen von Arten sind jedoch nicht nur von der Reaktion der einzelnen Art auf den Klimawandel abhängig, sondern werden auch durch die Fähigkeit zu wandern und sich gegenüber in neuen Gebieten vorkommenden Arten durchzusetzen bestimmt (Band 2, Kapitel 3).

Amphibien sind aufgrund ihrer Lebensraumansprüche und geringen Mobilität besonders durch den Klimawandel gefährdet. Die projizierte Änderung der Niederschlagsverteilung ist dabei als Gefährdungsfaktor vermutlich von größerer Bedeutung als Temperaturveränderungen (Band 2, Kapitel 3). Im Vordergrund stehen indirekte Auswirkungen (Band 2, Kapitel 1) als Folge von Lebensraumverlust, z. B. der mögliche Rückgang von periodischen Kleingewässern und der Verlust von Feuchtlebensräumen als Folge häufiger auftretender oder verlängerter Trockenperioden (Band 2, Kapitel 3).

Reptilien sind potentielle Gewinner des Klimawandels. Mit verlängerten sommerlichen Bedingungen ist für Reptilien in Österreich ein Anstieg des Reproduktionserfolges zu erwarten. Eine erfolgreiche Vermehrung nicht heimischer Reptilienarten (wie z. B. Schildkrötenarten) im Freiland wird vereinzelt bereits beobachtet (Band 2, Kapitel 3).

Eine Verschiebung in Richtung warmwasserliebender Fischarten ist zu erwarten. Eine Erwärmung von 2,5 °C (Band 2, Kapitel 2) könnte eine Höhenverschiebung der Fischregionen um 70 Höhenmeter bzw. eine Verlagerung der Fischregionen flussaufwärts im Ausmaß von ca. 30 km bedeuten (Band 2, Kapitel 3). Diese theoretische Verschiebung flussaufwärts wird aber in vielen Fällen nicht möglich sein, da die Gewässer dort oftmals für Fische zu klein sind. Insgesamt ist daher mit einem Verlust an Forellen- und Äschengewässern zu rechnen. Mehr als die Hälfte der heimischen Fischarten scheint bereits in den roten Listen auf und zusätzliche Belastungen durch Klimaänderungen aber auch dem weiteren Ausbau der Wasserkraft werden zu einer weiteren Gefährdung der heimischen Fischfauna führen (Band 2, Kapitel 3).

Der Klimawandel wirkt nicht nur auf einzelne Pflanzen- und Tierarten, sondern beeinflusst auch deren Zusammenspiel in Lebensgemeinschaften stark. Klimabedingt können sich in Zukunft die Beziehungen zwischen Räuber und Beute, Parasit und Wirt sowie Pflanze und Bestäuber ändern. Durch eine zeitliche Entkoppelung von Prozessen, wie z. B. dem

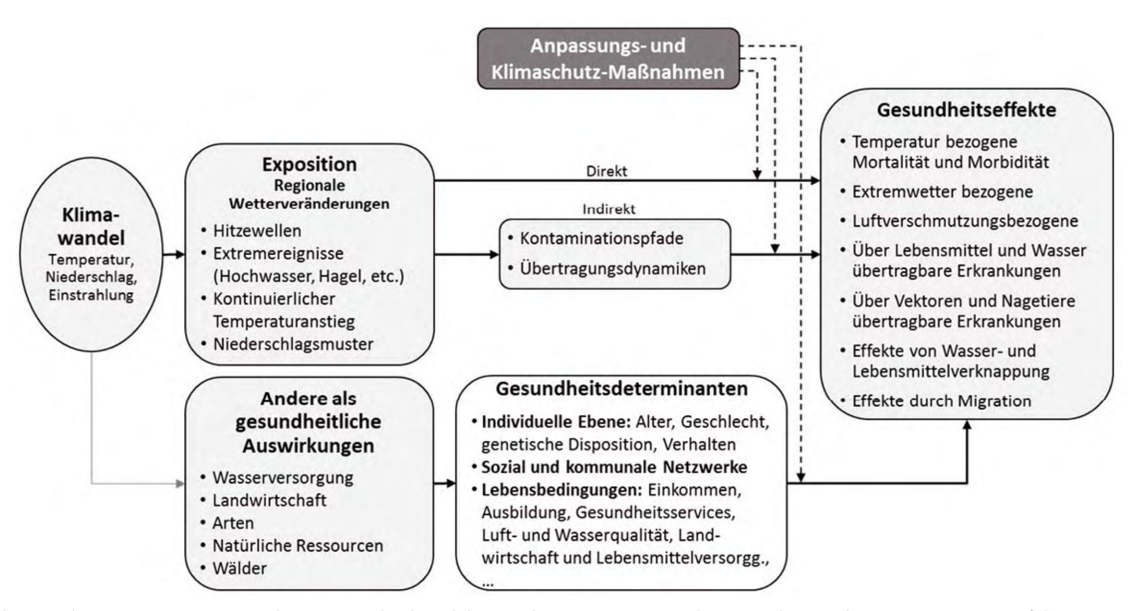


Abbildung S.2.5. Direkte und indirekte Wirkungspfade von Klimawandel auf Gesundheit. Quelle: adaptiert nach Confalonieri et al. (2007); McMichael et al. (2004)

Figure S.2.5. Direct and indirect impact chainsinfluencing pathways of climate change affecting health. Source: adapted from Confalonieri et al. (2007); McMichael et al. (2004)

Blühzeitpunkt von Pflanzen und dem Entwicklungsstadium des Bestäubers oder durch eine räumliche „Auseinanderverschiebung“ der Areale (geringere zukünftige Arealüberschneidungen von interagierenden Arten) können Ökosysteme stark beeinflusst werden (Band 2, Kapitel 3).

Generell sind Ökosysteme mit sehr langer Entwicklungsdauer besonders vom Klimawandel betroffen. Dazu zählen in Österreich sowohl Wälder als auch Lebensräume oberhalb der Waldgrenze und Moore. Durch die langsam ablaufende Entwicklung (relativ zum fortschreiten des Klimawandels) können sich derartige Ökosysteme nur bedingt an die klimatischen Änderungen anpassen. Die dadurch entstehende hohe Klimavulnerabilität betrifft sowohl die Pflanzen- als auch die Tierwelt in derartigen Ökosystemen (Band 2, Kapitel 3).

S.2.5 Auswirkungen auf den Menschen
S.2.5 Impacts on Humans

Die Zunahme von Hitzewellen führt zu steigenden Mortalitätsraten. Temperaturerhöhung und insbesondere Hitzewellen sind die Klimafaktoren mit den wahrscheinlich gravierendsten direkten Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit (Abbildung S.2.5). Hitze belastet den menschlichen Organismus und kann vor allem bei einer schlechten gesundheitlichen Ausgangslage bis hin zum Tod führen. Insbesondere bei älteren Personen aber auch bei Kleinkindern oder chronisch Kranken, werden vermehrt Herz-Kreislaufprobleme festgestellt, häufig infolge von Dehydration. Es gibt eine ortsabhängige Temperatur, bei welcher die Sterblichkeitsrate am geringsten ist; jenseits dieser nimmt die Mortalität pro 1 °C Temperaturanstieg um 1–6 % zu (sehr wahrscheinlich, hohes Vertrauen, Band 2, Kapitel 6, Band 3, Kapitel 4). Vor allem ältere Menschen und auch Kleinkinder weisen oberhalb dieser optimalen Temperatur einen deutlichen Anstieg des Sterberisikos auf. Über Anpassungsmöglichkeiten und Anpassungsgeschwindigkeit an höhere Mitteltemperaturen ist noch wenig bekannt. Hitzewellen belasten vor allem Menschen in städtischen Siedlungsräumen, da die Hitzewellen durch den städtischen Wärmeinseleffekt (höherer Strahlungsumsatz und Wärmespeicherung) in größeren Städten verstärkt und gegebenenfalls verlängert werden kann. Auch ist die nächtliche Abkühlung in städtischen Siedlungsräumen sehr viel geringer als im ländlichen Raum, wodurch die nächtliche Erholungsphase beeinträchtigt wird (Band 2, Kapitel 6). Für die Hitzewelle im Jahr 2003 wurden in Österreich zwischen 180 und 330 hitzebedingte Todesfälle registriert. Niederschlagsbedingte Extremereignisse (Muren, Überflutungen etc.) erhöhen die Verletzungsgefahr und können ebenfalls das Leben bedrohen. Die in Schwellen- und Entwicklungsländern häufig mit Über-

schwemmungen verbundene Seuchengefahr ist bei intakten hygienischen Rahmenbedingungen in Österreich ein geringeres Problem.

Indirekte Klimaauswirkungen auf die menschliche Gesundheit sind durch die Ausbreitung nichtheimischer Tier- und Pflanzenarten zu erwarten. Hier spielen vor allem jene Krankheitserreger eine Rolle, die von blutsaugenden Insekten und Zecken übertragen werden. Denn nicht nur die Erreger selbst, sondern auch die Vektoren (Insekten und Zecken) sind in ihrer Aktivität und Verbreitung von klimatischen Bedingungen abhängig. Neu eingeschleppte Krankheitserreger wie etwa Viren, Bakterien und Parasiten, aber auch allergene Pflanzen und Pilze, wie z. B. das Beifußblättrige Traubenkraut (*Ambrosia artemisiifolia*) sowie der Eichenprozessionsspinner (*Thaumetopoea processionea*) und neue Vektoren z. B. die Tigermücke (*Stegomyia albopicta*) können sich etablieren, aber auch bereits vorhandene Krankheitserreger können sich regional ausbreiten (oder auch verschwinden). So beobachtet man schon jetzt eine Verschiebung der Zeckenpopulationen in höhere Regionen. Nager dienen als Reservoire, ihre Verbreitung und Zahl verschiebt sich mit dem Klimawandel. Da komplexe Jäger-Beute-Beziehungen eine wichtige Rolle spielen, sind konkrete Abschätzungen zukünftiger Entwicklungen schwierig. Zu den möglicherweise vermehrt auftretenden Krankheiten zählen die von Zecken und anderen Vektoren übertragene Hirnhautentzündung, das Gelbfieber, Dengue, Malaria, Leishmania, Hanta sowie grippeartige Erkrankungen. Auch durch Trinkwasser und Lebensmittel übertragene Krankheitserreger (z. B. Salmonellen) sind temperaturabhängig und können sich bei höheren Durchschnittstemperaturen entsprechend weiter ausbreiten (Band 2, Kapitel 6).

Die gesundheitliche Betroffenheit durch den Klimawandel ist eng mit sozialen Bedingungen verknüpft. Meist ist es das Zusammentreffen verschiedener sozialer Faktoren (z. B. niedriges Einkommen, geringer Bildungsgrad, wenig Sozialkapital, prekäre Arbeits- und Wohnverhältnisse, Arbeitslosigkeit, eingeschränkte Handlungsspielräume), die weniger privilegierte Bevölkerungsgruppen besonders verwundbar für Folgen des Klimawandels machen. Ärmere soziale Schichten sind – zum Teil bedingt durch die Lage ihrer Wohnungen und Häuser im Siedlungsraum (z. B. im dicht verbauten Gebiet mit wenig Grün, im hochwassergefährdeten Bereich), mehr jedoch durch die bautechnische Beschaffenheit der Gebäude – dem Klimawandel gegenüber besonders exponiert und haben weniger Möglichkeiten zur Anpassung (z. B. an zunehmende Hitzewellen) und zum Schutz der Gesundheit. Die Abschwächung und Verkürzung der kalten Jahreszeit (weniger Heizgradtage) kann angesichts steigender Energiepreise hingegen als ein entlastender Faktor für sozial Schwächere wirken (Band 2, Kapitel 6).

Frauen handeln in vielen Bereichen klimafreundlicher als Männer, sind jedoch auch in Österreich oft stärker von Auswirkungen des Klimawandels betroffen. Während der Hitzewelle 2003 sind in Europa deutlich mehr Frauen als Männer (über alle Altersgruppen) zu Tode gekommen (Band 2, Kapitel 6).

Der klimabedingte Migrationsdruck auf Österreich aus Entwicklungs- und Schwellenländern wird zunehmen. Dies ist vor allem dem globalen Ungleichgewicht zwischen den Verursachern des Problems und den am meisten betroffenen Menschen geschuldet (Band 2, Kapitel 6; Band 2, Kapitel 1). Ob sich der steigende Migrationsdruck auch in erhöhten Einwanderungszahlen niederschlagen wird, hängt jedoch von der politischen Gestaltung ab (Band 2, Kapitel 6).

Gemessen am übrigen Europa werden für Österreich mittlere direkte Klimafolgekosten erwartet (Band 2, Kapitel 6)**.** Die zu erwartende höhere Variabilität im Niederschlag wird primär die Land- und Forstwirtschaft, und mit Einschränkungen auch die Energie- und Wasserwirtschaft der östlichen und südöstlichen Landesteile betreffen (Band 2, Kapitel 2; Band 2, Kapitel 3). Die potenzielle Zunahme extremer Niederschlagsereignisse sowie deren mittelbare Folgen, wie Überschwemmungen und Massenbewegungen, werden vor allem im alpinen Raum sowie in einigen Flusstälern hohe Schadenspotenziale für die Infrastruktur zeitigen (Band 2, Kapitel 2; Band 2, Kapitel 4). Es ist dabei zu beachten, dass die absolute Abschätzung der Klimafolgekosten schwierig ist, da nicht nur Veränderungen in der Qualität und Quantität eines Gutes bzw. einer Dienstleistung Berücksichtigung finden müssen, sondern auch Auswirkungen auf nicht über Märkte gehandelte Ökosystemleistungen (Band 2, Kapitel 6).

Die ökonomischen Gesamtschäden durch extreme Wetterereignisse sind in Österreich in den letzten Jahren stark angestiegen. Auf Basis von Versicherungsdaten wird für Österreich zwischen 1980 und 2010 ein Gesamtschaden durch extreme Wetterereignisse von 10,6 Mrd. Euro geschätzt (in Preisen von 2013, Abbildung S.2.6). Zu beachten ist jedoch, dass für das Ansteigen der ökonomischen Schäden sowohl die Anzahl und Intensität der Wetterereignisse als auch die steigende Exposition von Sachwerten verantwortlich sind. So sind z. B. aufgrund des starken Siedlungswachstums in einigen Risikoregionen die Schadenspotenziale in den vergangenen Jahrzehnten stark angestiegen. Für die Periode 2001 bis 2010 schlagen sich insbesondere die Hochwässer 2002 (rund 3,7 Mrd. Euro) und 2005 (knapp 0,6 Mrd. Euro) sowie mehrere starke Winterstürme mit Schäden von jeweils mehreren hundert Mil-

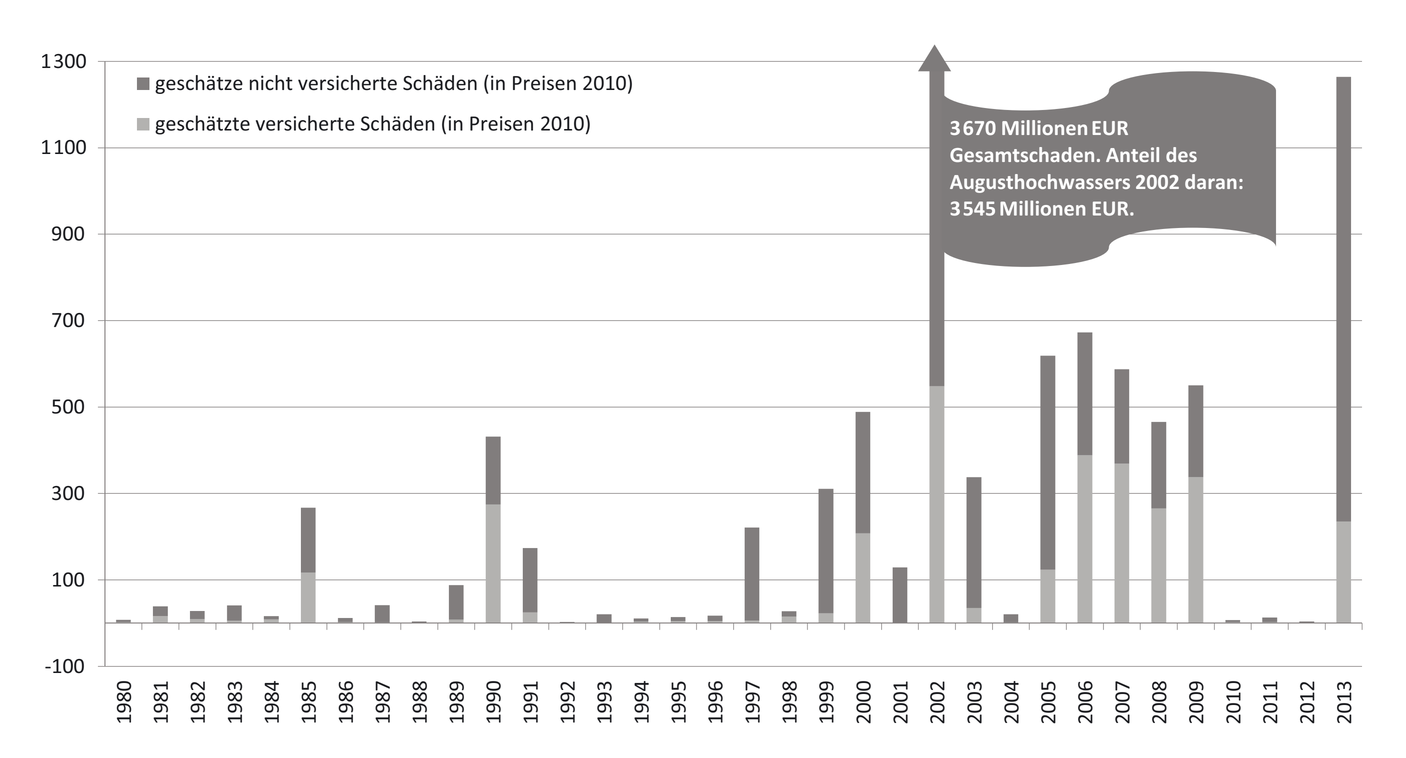


Abbildung S.2.6. Wetter- und witterungsbedingte Schäden in Österreich 1980 bis 2010. Copyright: Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft Geo Risks Research, NatCatSERVICE (2014)

Figure S.2.6. Weather and climate related damage in Austria 1980 to 2010. Copyright: Munich Re Geo Risks Research, NatCatSERVICE (2014)

lionen Euro zu Buche. Es ist zu beachten, dass es sich dabei lediglich um direkte Schadenskosten handelt, die durch Wiederherstellung und Reparaturen anfielen, während indirekte Kosten von Folgewirkungen nicht erfasst sind. Weiters finden viele kleinere Ereignisse oder sich langsam aufbauende Schäden hier keine Berücksichtigung, weswegen der ökonomische Gesamtschaden durch Wetterereignisse noch deutlich höher als die hier angeführten Werte liegen dürfte (Band 2, Kapitel 6).

Der Wintertourismus in Österreich wird mit hoher Wahrscheinlichkeit negativ vom Klimawandel betroffen sein. Eine winterliche Erwärmung und damit verbundene Verkürzung bzw. Unterbrechung der Saison sowie die geringere Schneesicherheit in tieferen Lagen und im Osten des Landes wird sich negativ auf den Wintertourismus auswirken. Weiters ist von einer steigenden Abhängigkeit von wasser- und energieintensiver künstlicher Beschneiung in ganz Österreich auszugehen (Band 2, Kapitel 6).

Für Bade- und Erholungstourismus bieten steigende Temperaturen sowie geringere Niederschlagshäufigkeit zukünftig Chancen. Diesbezüglich wird vor allem der Sommertourismus vom Klimawandel profitieren, wobei sich Österreich gegebenenfalls auch als „Sommerfrische" gerade für die Mittelmeerländer positionieren könnte. Allerdings müssen diese Potentiale auch entsprechend genutzt werden und es ist noch nicht klar, wie weit sich diese Möglichkeiten in Zukunft erschließen lassen werden. Es wird erwartet, dass die Zuwächse im Sommertourismus die Verluste im Wintergeschäft mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht kompensieren werden können (Band 2, Kapitel 6).

Der Städtetourismus zeigt sich insgesamt dem Klimawandel gegenüber als relativ robust. Auswirkungen sind insofern zu erwarten als sich die Aktivitäten von Städtetouristen eventuell stärker auf städtische Grünflächen, Parks und Gastgärten konzentrieren werden und nicht klimatisierte Gebäude in den Sommermonaten eher gemieden werden. Weiters ist mit einer Verlagerung der Besucherzahlen in Städten vom Sommer hin zu den Übergangsjahreszeiten zu rechnen (Band 2, Kapitel 6).

Hinsichtlich des Energiebedarfs werden die klimawandelbedingten Heizenergieeinsparungen mit hoher Wahrscheinlichkeit den zusätzlichen Energiebedarf zur Raumkühlung mehrfach übertreffen (Band 2, Kapitel 6)**.** Österreich deckt derzeit seinen Strombedarf zu etwa 60 % aus Wasserkraft. Für die Zukunft wird ein leichter Rückgang der Wasserkrafterzeugung erwartet, wobei die Produktion klimabedingt im Sommer ab- und im Winter zunehmen wird. Die vorliegenden Prognosen zeigen Unterschiede in der Jahreserzeugung die bis Ende dieses Jahrhunderts zwischen ±5 % und

–15 % liegen. Bezüglich des Kühlwasserbedarfs von Kraftwerken sind regional und saisonal Einschränkungen möglich, wie z. B. im Sommer im Voralpenbereich. Kalorische Anlagen an den größeren Flüssen (Drau, Inn, Mur, Donau) sollten jedoch auch in Zukunft keinen Nutzungseinschränkungen unterliegen (Band 2, Kapitel 2).

Der nicht durch Naturgefahren gefährdete Siedlungsraum wird sich weiter verkleinern. Derzeit befinden sich in Österreich rund 400 000 Gebäude in Hochwassergefahrenzonen. Es ist davon auszugehen, dass sich der künftige Siedlungsraum auch weiter in die Hochwassergefahrenzonen ausdehnen wird, sofern die Raumordnung nicht restriktiv einschreitet (Band 2, Kapitel 6). Zudem muss erwartet werden, dass sich Hochwasserzonen klimabedingt ausdehnen werden (Band 2, Kapitel 2). Gerade in Alpentälern wird die weitere Ausdehnung der Siedlungsfläche erschwert werden, da sich sowohl die Hochwasserzonen in den Tälern als auch die durch Massenbewegungen gefährdeten Bereiche in Hanglagen vergrößern werden (Band 2, Kapitel 2; Band 2, Kapitel 4; Band 2, Kapitel 6).

Energie- und Verkehrsinfrastrukturen weisen eine hohe Exposition gegenüber dem Klimawandel auf, zumal sie sich häufig in exponierten Lagen befinden. Eine Unterbrechung an einer Stelle kann aufgrund der Netzstruktur oftmals zu großflächigen Serviceausfällen führen. Verkehrsinfrastrukturen sind sehr wahrscheinlich von extremen Niederschlagsereignissen besonders betroffen – aktuell treten an ihnen mehr als drei Viertel aller Schäden aus mittelbaren Folgewirkungen extremer Niederschläge (Muren, Rutschungen, Unterspülungen, Lawinen) auf. Das Ausmaß direkter Schäden durch zukünftige Extremereignisse hängt vom Szenario ab; jedenfalls können die indirekte Schäden und Folgekosten ein bedeutend höheres Ausmaß annehmen (Band 2, Kapitel 6).

Wetterbedingte Störungen in der Energieinfrastruktur können durch Kaskadeneffekte zu großräumigen „Black-Outs" führen. Gefährdungen gehen einerseits von physischen Schäden durch Massenbewegungen und Hochwasser aus (Band 2, Kapitel 2; Band 2, Kapitel 4; Band 2, Kapitel 6). Andererseits können auch Hitzewellen zu Netzproblemen führen, da hitzebedingt sowohl in der Energieerzeugung Probleme auftreten können (Niedrigwasser und verminderte Kühlwasserzufuhr, Erreichen von zulässigen Temperaturgrenzen), als auch die Durchleitungen in Richtung Italien bei zugleich steigendem Energiebedarf in Österreich (Kühlenergie und Bewässerung) besonders beansprucht sind (hoher Energiebedarf in Südeuropa und geringere Kraftwerksleistungen ebendort; Band 2, Kapitel 6).

S.3 Klimawandel in Österreich: Vermeidung und Anpassung
S.3 Climate Change in Austria: Mitigation and Adaptation

S.3.1 Emissionsminderung und Anpassung an den Klimawandel
S.3.1 Mitigation and Adaptation to Climate Change

Erfordernisse für Emissionsminderung auf globaler Ebene. Die globalen THG-Emissionen steigen weiterhin entlang des „BAU" Szenarios und werden sich, wenn sich dieser Trend fortsetzt, bis zur Mitte des Jahrhunderts verdoppelt haben. Eine Stabilisierung des Anstiegs der globalen Jahresmitteltemperatur unter 2 °C zum Ende des Jahrhunderts (im Vergleich zum vorindustriellen Temperaturniveau) erfordert bis zur Mitte des Jahrhunderts eine Minderung der THG-Emissionen um zumindest 50 % der derzeitigen Emissionen im globalen Durchschnitt bzw. um bis zu 90 % in industrialisierten Ländern (Band 3, Kapitel 1).

Die Veränderung der globalen Jahresdurchschnittstemperatur im Bereich von 4 °C und darüber, welche bei einem BAU-Szenario zu erwarten ist, bewegt sich in einer Größenordnung die der Differenz des Übergangs von Eiszeit zu Zwischeneiszeit entspricht. Eine um 4 °C erwärmte Erde wäre etwa im Vergleich zu den letzten 10 000 Jahren, die zum Hervorgehen der Zivilisationen führten, eine Welt mit kaum beherrschbaren Folgen für Natur und Gesellschaft. Auch eine Erwärmung um 2 °C wäre mit signifikanten Veränderungen verbunden, stellt aber einen Schwellenwert dar, bei dem davon auszugehen ist, dass katastrophalere Folgen vermieden werden könnten (Band 1, Kapitel 1; Band 3, Kapitel 1).

Sowohl Maßnahmen zur Emissionsminderung als auch zur Anpassung sind unbedingt erforderlich für jegliches Stabilisierungsniveau des globalen Temperaturanstiegs. Unter Emissionsminderung (engl.: Mitigation) von THG-Emissionen, werden technologischer Wandel, wie z. B. Effizienzsteigerungen und Verhaltensänderungen zur Reduktion des Ressourcenverbrauchs sowie der Emissionen pro produzierter Einheit verstanden. Es wird darauf abgezielt Klimaänderungen durch Management der Einflussfaktoren zu verringern. Im Gegensatz dazu beschreibt Klimawandelanpassung (engl.: Adaptation) Initiativen und Maßnahmen um die Verwundbarkeit gegenüber akuten oder erwarteten Auswirkungen des Klimawandels zu reduzieren oder die Resilienz von Mensch-Umwelt-Systemen gegenüber diesen zu erhöhen, beispielswei-

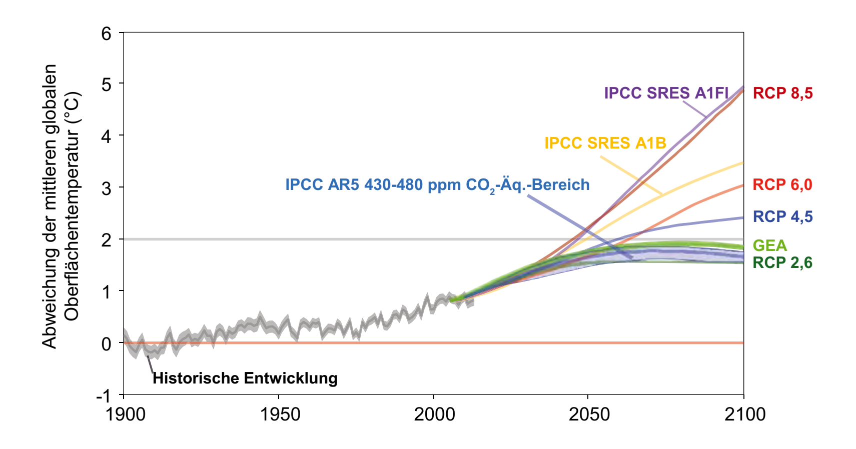


Abbildung S.3.1. Abweichung der mittleren globalen Oberflächentemperatur (°C), historische Entwicklung sowie Darstellung von vier Gruppen an Zukunfts-Szenarien: zwei IPCC SRES-Szenarien ohne Emissionsminderung (A1B und A1F1) die bei etwa 5 °C bzw. knapp über 3 °C Temperaturanstieg im Jahr 2100 liegen (im Vergleich zum Durchschnitt der ersten Dekade des 20. Jahrhunderts), vier neue Emissionsminderungsszenarien welche für IPCC AR5 entwickelt wurden (RCP8,5; 6,0; 4,5 und 2,6), 42 GEA-Emissionsminderungsszenarien und der Bereich der IPCC AR5-Szenarien die alle die Temperatur bis 2100 bei maximal plus 2 °C stabilisieren. Quellen: IPCC SRES (Nakicenovic et al., 2000; IPCC WG I, 2014 und GEA, 2012)

Figure S.3.1. Global mean surface temperature anomalies (°C) relative to the average temperature of the average of the first decade of the 20th century, historical development, and four groups of trends for the future. Two IPCC SRES scenarios without emission reductions (A1B and A1F1), which show temperature increases to about 5 °C or just over 3 °C to the year 2100, and four new emission scenarios, which were developed for the IPCC AR5 (RCP8, 5, 6.0, 4.5 and 2.6), 42 GEA emission reduction scenarios and the range of IPCC AR5 scenarios which show the temperature to stabilize in 2100 at a maximum of +2 °C Sources: IPCC SRES (Nakicenovic et al., 2000; IPCC WG I, 2014 and GEA, 2012)

se durch Hochwasserschutz oder die Ansiedelung von besser angepassten Pflanzenarten.

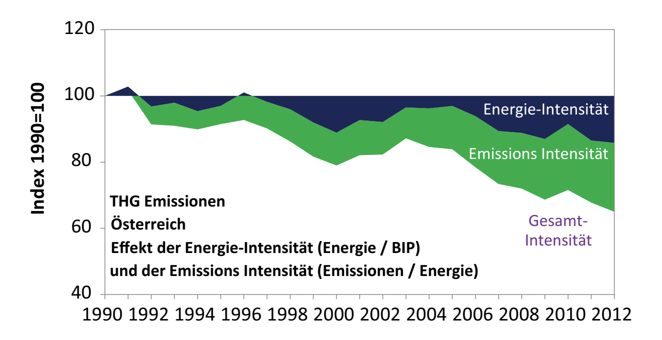
Entschlossene Emissionsminderungsmaßnahmen wären nötig, um jegliche Ziele zur Stabilisierung des Klimas entgegen der derzeitigen Emissionstrends zu erreichen. Eine vollständige Umsetzung der in Cancun und dem Copenhagen Accord gesetzten freiwilligen Emissionsminderungsziele (sogenannter Pledges) korrespondiert mit einem Entwicklungspfad, der zu einer globalen Erwärmung von über 3 °C (mit 20 % Wahrscheinlichkeit über 4 °C) bis Ende des Jahrhunderts führt (siehe Abbildung S.3.1).

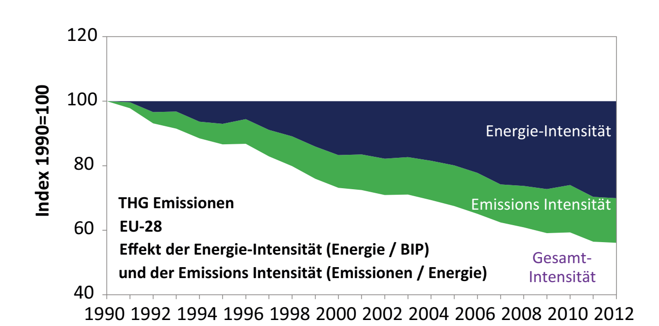
Bedeutende Emissionsminderungsmöglichkeiten bestehen auf globaler Ebene in den Bereichen Energieversorgung, Verkehr, Gebäude, Industrie, Land- und Forstwirtschaft sowie Abfall. Diese werden in den nachfolgenden Kapiteln von Band 3 genauer behandelt.

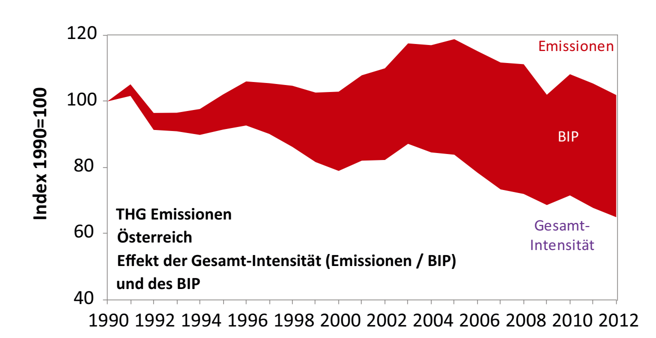
Im Rahmen des Europäischen „Burden Sharing Agreements" zur Umsetzung des Kyoto-Protokolls hat sich Österreich zu einer THG-Reduktion von 13 % im Zeitraum 2008 bis 2012 gegenüber 1990 verpflichtet. Im Gegensatz zur Mehrheit der anderen EU-Mitgliedsstaaten (darunter Deutschland, Großbritannien, Frankreich und Schweden) sind die THG-Emissionen in Österreich deutlich gestiegen. Damit konnte das österreichische Kyoto-Ziel nicht durch heimische Emissionsreduktionen erfüllt werden. Eine formale Erfüllung wurde durch Zertifikatzukäufe im Ausland im Ausmaß von etwa 80 Mio. t CO_2-Äq. mit einem Mittelaufwand von rund 500 Mio. € erreicht.

Das Kernelement der Europäischen Klimapolitik ist das Europäische Energie- und Klimapaket, das die drei Kernziele Reduktion der THG-Emissionen um 20 %, Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energiequellen am Endenergieverbrauch auf 20 % sowie Erhöhung der Energieeffizienz um 20 % („20-20-20-Ziel") bis zum Jahr 2020 verglichen mit 2005 definiert. Das Klima- und Energiepaket wird darüber hinaus durch weitere Maßnahmen und Richtlinien (Europäischer Emissionshandel, Energieeffizienz, Förderung erneuerbarer Energien, Ecodesign, Energy Performance of Buildings, Kraft-Wärme-Kopplung) ergänzt (Band 3, Kapitel 1; Band 3, Kapitel 6).

Um gefährliche Klimaveränderungen zu begrenzen und den durchschnittlichen Temperaturanstieg unter 2 °C zu halten (verglichen mit vorindustriellen Niveaus), bestätigte der Europäische Rat im Februar 2011 das Vorhaben der EU, die THG-Emission der EU bis 2050 um 80–95 % zu reduzieren (verglichen mit den Werten von 1990). Einige europäische Länder (Großbritannien, Dänemark, Finnland, Portugal und Schweden) haben bereits konkrete Ziele zur Emissionsminderung für die Zeit bis 2050 vorgelegt. **Österreich hat sich bisher für den Klima- und Energiebereich lediglich kurzfris-**







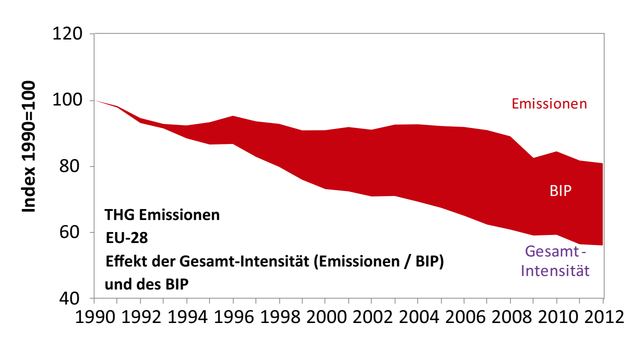


Abbildung S.3.2. Entwicklung der THG-Intensität des BIPs sowie die darin enthaltene Entwicklung der Energieintensität (Energieverbrauch pro Euro BIP) und Emissionsintensität der Energie (THG-Emissionen pro PJ Energie) im Zeitverlauf für Österreich und die EU-28 (oberes Panel). Aus der Entwicklung der THG-Intensität in Verbindung mit der des fast ausnahmslos steigenden BIP (unteres Panel) ergeben sich für Österreich insgesamt in diesem Zeitraum steigende THG-Emissionen (+5 %), für die EU-28 fallende (−18 %). Quelle: Schleicher (2014)

Figure S.3.2. Development of the GHG emission intensity of the GDP and the embedded relative importance of energy intensity (energy use per PJ GDP) in Austria and the 28 member states of the EU (upper panel). When combining this GHG emission indicator per GDP with the clear upward development of the GDP (lower panel), Austria shows an increase of GHG emissions during that period (+5 %) while emissions dropped in the EU-28 (−18 %). Source: Schleicher (2014), based on Eurostat

tige Minderungsziele, nämlich für den Zeitraum bis 2020 gesetzt (Band 3, Kapitel 1; Band 3, Kapitel 6)**.**

Die bisher gesetzten Maßnahmen decken den von Österreich erwarteten Beitrag zur Erreichung des globalen 2 °C Ziels nicht ab. Für die Erreichung der Ziele gemäß dem EU Energie- und Klimapaket bis 2020, wird für Österreich ein Reduktionserfordernis von 14 Mio. t CO_2-Äq. gegenüber einer Referenzentwicklung geschätzt. Diese vergleichsweise bescheidene Minderung ist beispielsweise durch die Umsetzung eines Maßnahmenbündels von Technologieoptionen mit einem Fokus auf Energieeffizienz möglich und würde ein zusätzliches jährliches Investitionsvolumen von 6,3 Mrd. € im Zeitraum 2012 bis 2020 erfordern. Neben der Emissionsminderung ergeben sich ein Output-Effekt von ca. 9,5 Mrd. € und etwa 80 000 zusätzliche Beschäftigungsverhältnisse. Gleichzeitig liegen die Betriebskosteneinsparungen im Jahr 2020 (unter eher konservativen Annahmen bezüglich zukünftiger Energiepreise) bei 4,3 Mrd. € (Band 3, Kapitel 1).

Österreich hat großen Nachholbedarf in der Verbesserung der Energieintensität. Anders als der EU-Durchschnitt weist Österreich in den letzten beiden Dekaden eine relativ gleichbleibende Energieintensität auf (Energieverbrauch pro Euro BIP, siehe Abbildung S.3.2). Seit 1990 sank vergleichsweise hingegen die Energieintensität der EU-28 um 29 % (z. B. in den Niederlanden um 23 %, in Deutschland um 30 % und in Großbritannien um 39 %). In Deutschland und Großbritannien dürfte jedoch ein Teil dieser Verbesserungen auf der Verlagerung energieintensiver Produktionen ins Ausland beruhen. In der Emissionsintensität (THG-Emissionen pro PJ Energie), deren Verbesserung in Österreich den Ausbau der Erneuerbaren seit 1990 reflektiert, zählt Österreich hingegen gemeinsam mit den Niederlanden zu den Ländern mit der stärksten Verbesserung. Diese beiden Indikatoren gemeinsam bestimmen die THG-Emissionsintensität des BIPs, die sowohl in Österreich als auch in den EU-28 seit 1990 abgenommen hat. Die THG-Emissionen sind also langsamer gestiegen als das BIP. Im Vergleich mit den EU-28 zeigt sich nochmals deutlich, dass Österreich bei der Senkung der Energieintensität großen Nachholbedarf hat (Band 3, Kapitel 5).

Der Klimawandel verursacht auf globaler und europäischer Ebene hohe Kosten. Die dem Klimawandel zuzuschreibenden globalen Schäden liegen deutlich jenseits von

100 Mrd. € pro Jahr und könnten sogar jenseits von einer Billion pro Jahr liegen. Für Europa wurden die Kosten aus Schäden durch extreme Wetterereignisse im Jahr 2080 auf 20 Mrd. € (bei globaler Erwärmung von 2,5 °C) bis 65 Mrd. € (bei globaler Erwärmung von 5,4 °C und starkem Anstieg des Meeresspiegels) geschätzt. Diese Kostenschätzungen sind jedoch mit vielen Unsicherheiten behaftet und nicht-monetarisierbare Schäden (wie z. B. der Verlust einzigartiger Lebensräume) werden dabei nicht berücksichtigt. Wie für viele andere Länder liegen auch für Österreich detaillierte Studien zu den Kosten des Klimawandels bislang nur für ausgewählte Sektoren und Regionen vor (Band 2, Kapitel 6).

Trotz bestehender Unsicherheiten über das konkrete Ausmaß der Klimawandelfolgen für die unterschiedlichen Regionen und Bereiche ist die frühzeitige **Planung und Durchführung von konkreten Anpassungsmaßnahmen** von großer Wichtigkeit. Zuwarten verringert die Möglichkeiten für erfolgreiche Anpassung und erhöht die damit verbundenen Kosten. **Anpassungsmaßnahmen können die negativen Auswirkungen des Klimawandels abmildern, aber nicht vollständig ausgleichen** (mittleres Vertrauen).Für die vorausschauende Planung und Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen steht eine breite Auswahl von Möglichkeiten zur Verfügung, die sowohl von betroffenen BürgerInnen als auch von Gemeinden / Regionen, dem Bund oder privaten und öffentlichen Einrichtungen durchgeführt werden können, wie z. B. Wissenserweiterung, technologische Maßnahmen, Bewirtschaftungsänderungen (Band 3, Kapitel 1; Band 3, Kapitel 6).

Auf internationaler Ebene stand, beginnend ab 1994 unter der UNCCD und ab 2001 unter der UNFCCC in Form der „National Adaptation Programmes of Action“ (NAPA), zunächst die Unterstützung der gegenüber dem Klimawandel am meisten verletzlichen Staaten im Vordergrund. Die durch den Klimawandel bedingten Schäden in Entwicklungsländern im Jahr 2030 werden grob geschätzt zwischen 25 und 70 Mrd. € liegen, sofern keine Anpassungsmaßnahmen gesetzt werden. Dem gegenüber stehen derzeit kumulierte finanzielle Unterstützungen für Anpassung in Entwicklungsländern durch Industriestaaten unter der UNFCCC im Ausmaß von weniger als 0,8 Mrd. € gegenüber (Band 3, Kapitel 1).

Seit 2005 ist auf europäischer Ebene das Thema Anpassung an den Klimawandel präsent und wurde in die Fortschreibung des Europäischen Klimaänderungsprogramms (Second European Climate Change Programme, ECCP II) integriert. Die Europäische Kommission (EK) hat mit dem Grün- und dem Weißbuch zur Anpassung erste Schritte gesetzt, um die Resilienz der EU gegenüber dem Klimawandel zu erhöhen. Während das Grünbuch die Notwendigkeit der Anpassung auf Europäischer Ebene argumentiert, präsentiert das Weißbuch zur Anpassung bereits einen Aktionsrahmen, innerhalb dessen sich die EU und ihre Mitgliedstaaten auf die Folgen des Klimawandels vorbereiten sollen. Im Frühjahr 2013 wurde die EU-Anpassungsstrategie beschlossen (Band 3, Kapitel 1).

Europäische Aktivitäten auf politischer Ebene, wie etwa die Publikation des Grün- und des Weißbuches zur Anpassung, aber auch neues Wissen aus der Forschung haben eine Vielzahl von europäischen Staaten dazu veranlasst, an der Erstellung von nationalen Strategien zur Anpassung an das veränderte Klima zu arbeiten. Bis dato haben 14 europäische Länder eine Anpassungsstrategie verabschiedet (Belgien, Dänemark, Frankreich, Deutschland, Ungarn, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Portugal, Schweiz, Spanien, Großbritannien). **Österreich hat 2013 eine nationale Anpassungsstrategie verabschiedet, um den Folgen des Klimawandels gezielt begegnen zu können.** Die Wirksamkeit dieser Strategie wird vor allem daran gemessen werden, wie erfolgreich einzelne betroffene Sektoren bzw. Politikbereiche in der Entwicklung geeigneter Anpassungskonzepte und deren Umsetzung sein werden. Grundlagen für deren Evaluierung, wie z. B. eine regelmäßige Erhebung der Verletzlichkeit nach dem Muster anderer Staaten sind in Österreich noch nicht vorhanden (Band 3, Kapitel 1).

Studien zu den Kosten von Maßnahmen zur Klimawandelanpassung in Europa und Österreich umfassen in der Regel ausgewählte Sektoren und Regionen. Demzufolge sind die Kostenbandbreiten groß und es besteht Forschungsbedarf zur Verbesserung der Grundlagen für Kosten / Nutzenschätzungen.

Aus der Notwendigkeit sowohl Emissionsminderung als auch Klimawandelanpassung zu betreiben, ergibt sich Abstimmungsbedarf, etwa hinsichtlich ihrer unterschiedlichen Fristigkeit. Erfolgt Klimaschutz in zu geringem Umfang würde dies mittel- bis langfristig einen massiven Anpassungsbedarf nach sich ziehen, der in zunehmendem Maße nicht mehr durch „softe“ oder „grüne“ Maßnahmen zu bewältigen wäre, sondern graue / technische und somit gleichzeitig kostenintensivere Maßnahmen nach sich ziehen würde. Da umgekehrt Anpassungsmaßnahmen auch CO_2-intensiv sein können, ergibt sich bei der Planung ein Abstimmungsbedarf mit Klimaschutz, um diesem nicht entgegenzuwirken, sondern, wenn möglich, zu unterstützen (Band 3, Kapitel 1).

Lange Nutzungsdauern von Anlagen können einen emissionsintensiven Entwicklungspfad für Jahrzehnte festschreiben (Lock-in-Effekt). Investitionen in Produktionsprozesse, Verkehrssysteme, Energieanwendung und -transformation sind auf sogenannte Lock-in-Effekte hin zu überprüfen,

weil bestehende Kapitalstöcke Minderungsmaßnahmen über die gesamte Nutzungsdauer erschweren und verteuern (Band 1, Kapitel 5; Band 3, Kapitel 1; Band 3, Kapitel 6).

Neben der Schaffung eines transformationsförderlichen Umfeldes ist auch das Beseitigen von Barrieren ein wichtiges Handlungsfeld. Dies ist ein auch international zunehmend wichtiges Thema, das auch in theoretisch-konzeptionelle Diskussionen zu geeigneten Referenzrahmen für ein transformationsförderliches Umfeld eingebettet ist.

Es ist eine Tatsache, dass es trotz gut belegter Studien zu Klimafolgen weder international noch in Österreich zu entsprechend entschiedenem Handeln zum Schutz des Klimas sowie zur Anpassung an den Klimawandel kommt. Dafür werden insbesondere auch Barrieren verantwortlich gemacht. Für Österreich wurden folgende relevante Barrieren identifiziert (hohes Vertrauen).

1. *Institutionelle Barrieren:* Bestehende Verwaltungsstrukturen sind aufgrund von komplexen sektoralen und föderalen Kompetenzaufteilungen zur effektiven Bearbeitung des Klimawandels wenig geeignet. Ebenso stellen die – im Verhältnis zu den langsamen, aber stetigen Prozessen des Klimawandels – kurzen Zeithorizonte gewählter politischer EntscheidungsträgerInnen eine Barriere dar. Auch internationale Rahmenbedingungen spielen eine wichtige Rolle.
2. *Wirtschaftliche Barrieren:* Bei vielen einzelwirtschaftlichen Entscheidungen wird der Eigennutz über das Gemeinwohl gestellt. Märkte versagen daher bei der Lösung des Klimaproblems, wenn Klimafolgen unzureichend oder gar nicht im Preis oder bei Marktregeln berücksichtigt werden. Zudem können sogenannte *Rebound*-Effekte durch gesteigerte Energieeffizienz zu Kosteneinsparungen führen, die wiederum zu höherer Energienachfrage führen.
3. *Soziale Barrieren:* Bei Haushalten und Unternehmen besteht eine Diskrepanz zwischen Umweltbewusstsein und faktischem Handeln. Dies ist oft in einem unzureichenden Vertrauen begründet, dass eigenes Handeln auf einer aggregierten Ebene einen relevanten Beitrag zu leisten vermag.
4. *Unsicherheiten und unzureichendes Wissen:* Unterschiedliche Ansichten zu wechselseitigen Beeinflussungen zwischen natürlichen, technischen und sozialen Systemen (z. B. inwiefern technologische Optionen das Klimaproblem lösen können) sowie widersprüchliche Berichterstattung dämpfen die Bereitschaft für entschiedenes Handeln.

Beispiele für Ansätze zur Überwindung der Barrieren sind eine umfassende Reform der Verwaltungsstrukturen in Hinblick auf die zu bewältigenden Aufgaben oder die Bildung von neuen Netzwerken, die korrekte Bepreisung von Produkten und Dienstleistungen entsprechend ihrer Klimawirkung sowie entsprechende ordnungsrechtliche Rahmenbedingungen, eine stärkere Einbeziehung von VerantwortungsträgerInnen, einschließlich der Zivilgesellschaft und der Wissenschaft, in Entscheidungsfindungsprozesse, die gezielte Steigerung des klima- und umweltbezogenen Wissens sowie das Schließen handlungsrelevanter Wissenslücken.

S.3.2 Land- und Forstwirtschaft, Wasser, Ökosysteme und Biodiversität

S.3.2 Agriculture and Forestry, Hydrology, Ecosystems and Biodiversity

Der Klimawandel stellt für Management, Nutzung und Schutz von terrestrischen und aquatischen Ökosystemen sowie für die nachhaltige Bewirtschaftung der Schlüsselressource Wasser eine besondere Herausforderung dar. Diese stellt sich je nach betroffenem System – von weitgehend natürlichen Ökosystemen und Schutzgebieten bis hin zu intensiv genutzten Agrarökosystemen – unterschiedlich dar.

Das Landsystem zeichnet sich durch die sehr engen Verflechtungen zwischen sozialen, wirtschaftlichen, geomorphologischen, klimatischen und ökologischen Faktoren aus. **Zwischen Land- und Forstwirtschaft, Wasserwirtschaft und Gewässerschutz sowie Erhaltung von Ökosystemen und Biodiversität bestehen zahlreiche klimarelevante Wechselwirkungen**. Diese führen dazu, dass Veränderungen in einem Bereich, etwa in Wirtschaft und Gesellschaft, Auswirkungen in vielen anderen Bereichen haben (Abbildung S.3.3; Band 2, Kapitel 3; Band 3, Kapitel 2)

So kann beispielsweise eine Maßnahme zur Veränderung von THG-Emissionen – z. B. die Ausweitung von Waldflächen und die Erhöhung der Bestockungsdichte im Wald zur Bindung von Kohlenstoff (C) – zu (positiven oder negativen) Rückwirkungen auf die Produktionsleistung (etwa die land- und forstwirtschaftliche Produktion) sowie auf andere Ökosystemleistungen (etwa die Rückhaltekapazität für Wasser oder den Schutz vor Lawinen oder Murenabgängen), auf die Biodiversität, das Risiko von Schadereignissen (Windwurf, Borkenkäferbefall) im Wald sowie auf den Klimaschutz selbst (z. B. indirekte Landnutzungseffekte) haben. Diese Wechselwirkungen können auch die THG-Reduktionspotenziale, die mit einer Maßnahme erzielt werden können, maßgeblich beeinflussen. Dies betrifft u. a. die Frage der bei einem Ersatz von Fossilenergie durch Bioenergie erzielbaren THG-Einsparungen, welche durch systemische Effekte im Bereich der Landnutzung (z. B. Landnutzungsänderungen durch Ausweitung von Anbauflä-

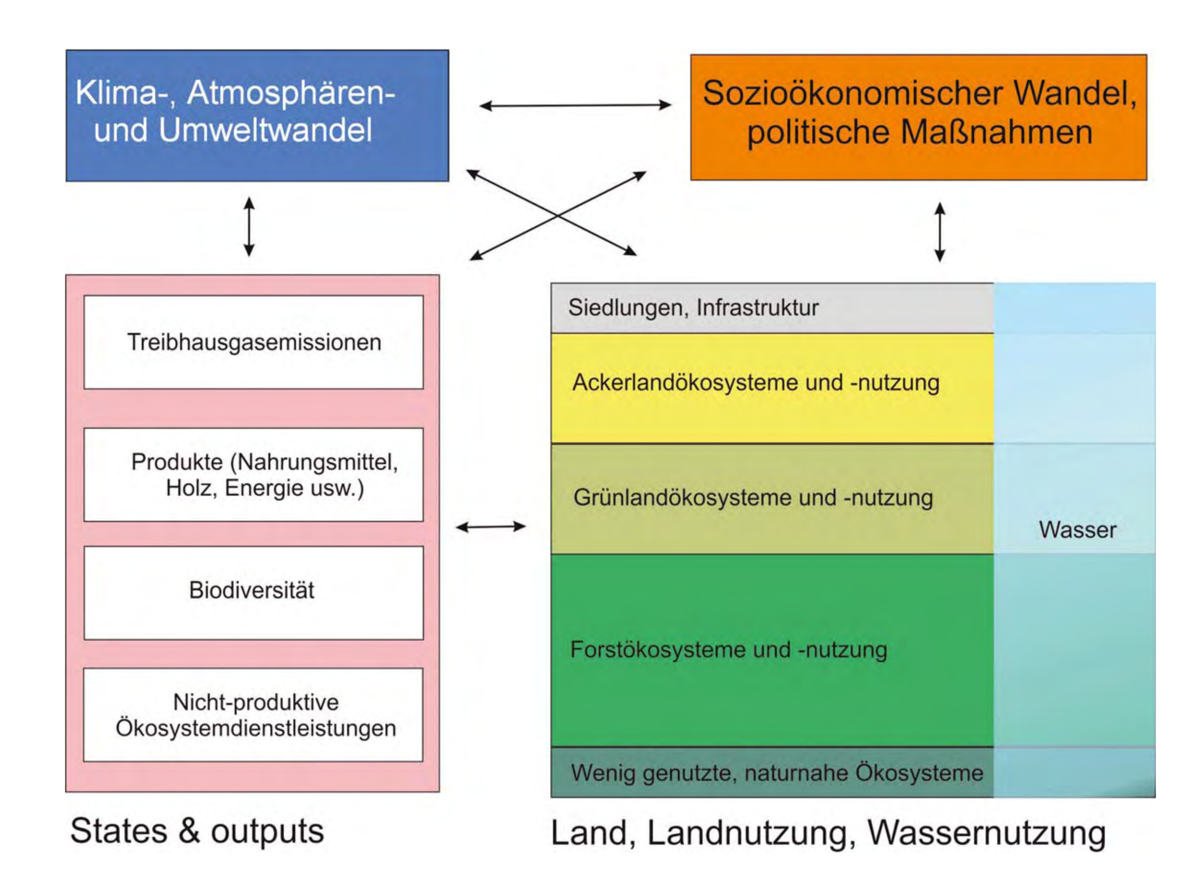


Abbildung S.3.3. Das Landsystem ist durch intensive systemische Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Bereichen, wie Wirtschaft, Gesellschaft, Klima und Klimawandel, Ökosystemen usw., gekennzeichnet. Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel oder zur Reduktion von THG-Emissionen haben daher in der Regel zahlreiche weitere Wirkungen zur Folge. Quelle: Adaptiert nach GLP (2005); MEA (2005); Turner et al. (2007)

Figure S.3.3. Land systems are characterized by intensive systemic feedbacks between different components such as the society, the economy, climate and climate change, ecosystems, etc. Activities to reduce GHG emissions or to adapt to climate change therefore often cause numerous additional effectsimpacts. Source: Adapted from GLP (2005); MEA (2005); Turner et al. (2007)

chen in anderen Regionen) erheblich beeinflusst werden können. Die Berücksichtigung aller relevanten Wechselwirkungen („feedbacks“) stellt eine große wissenschaftliche Herausforderung dar, ist aber für die Entwicklung robuster Strategien zum Umgang mit dem Klimawandel von großer Bedeutung.

Die Landwirtschaft kann in vielfältiger Weise THG-Emissionen verringern und Kohlenstoffsenken verstärken. Bei gleichbleibender Produktionsmenge liegen die größten Potenziale in den Bereichen Wiederkäuerfütterung, Düngungspraktiken, Reduktion der Stickstoffverluste und Erhöhung der Stickstoffeffizienz (sehr wahrscheinlich). Nachhaltige Strategien zur THG-Reduktion in der Landwirtschaft erfordern ressourcenschonende und -effiziente Bewirtschaftungskonzepte unter Einbeziehung von ökologischem Landbau, Präzisionslandwirtschaft und Pflanzenzucht unter Erhaltung der genetischen Vielfalt.

Die klimarelevanten Emissionen aus dem Sektor Landwirtschaft sanken in Österreich zwischen 1990 und 2010 um 12,9 %. Dies war zunächst vor allem auf eine Abnahme der Tierzahlen (bis 2005) und danach (2008 bis 2010) auf eine Reduktion des Stickstoffdüngereinsatzes zurückzuführen. Gleichzeitig stiegen in diesem Zeitraum die Tierzahlen bei Schweinen und Rindern wieder an, was zu einer Erhöhung der Emissionen aus der Wiederkäuerverdauung und den Wirtschaftsdüngern führte. Die Landwirtschaft war im Jahr 2010 mit 7,5 Mt CO_2-Äq. für 8,8 % der bilanzierten österreichischen THG-Emissionen verantwortlich (Band 3, Kapitel 2).

Der Ausbau landwirtschaftlicher Bioenergieproduktion kann u. a. im Rahmen einer Strategie zur integrierten Optimierung von Lebensmittel- und Energieproduktion sowie in Form kaskadischer Nutzung von Biomasse zur THG-Reduktion beitragen. Dabei können auf landwirtschaftlichen Flächen die Potenziale zur THG-Reduktion vergrößert werden, indem Fruchtfolgen, Tierhaltung und Biomassenutzungsflüsse im Hinblick auf Nahrungs-, Faser- und Energieproduktion integriert optimiert werden. Zugleich sind jedoch in systemischer

Betrachtungsweise Energie- und Wasserbilanz, Biodiversitätserhalt u. a. mehr zu beachten (Band 3, Kapitel 2).

Anpassungsmaßnahmen in der Landwirtschaft können unterschiedlich rasch umgesetzt werden. Innerhalb weniger Jahre umsetzbar sind unter anderem verbesserter Verdunstungsschutz im Ackerbau (z. B. effiziente Mulchdecken, reduzierte Bodenbearbeitung, Windschutz), effizientere Bewässerungsmethoden, Anbau trocken- oder hitzeresistenterer Arten bzw. Sorten, Hitzeschutz in der Tierhaltung, Veränderung der Anbau- und Bearbeitungszeitpunkte sowie der Fruchtfolge, Frostschutz, Hagelschutz und Risikoabsicherung. (Band 3, Kapitel 2).

Mittelfristig umsetzbare Anpassungsmaßnahmen umfassen unter anderem Boden- und Erosionsschutz, Humusaufbau, bodenschonende Bewirtschaftungsformen, Wasserrückhaltestrategien, Verbesserung von Bewässerungsinfrastruktur und -technik, Warn-, Monitoring- und Vorhersagesysteme für wetterbedingte Risiken, Züchtung stressresistenter Sorten, Risikoverteilung durch Diversifizierung, Steigerung der Lagerkapazitäten sowie Tierzucht und Anpassungen im Stallbau und in der Haltungstechnik (Band 3, Kapitel 2).

Grundsätzlich können im Sektor Landwirtschaft Anpassungsmaßnahmen auf Betriebsebene und auf überbetrieblicher Ebene (privater / öffentlicher Bereich) entschieden oder angeordnet werden, wobei die Umsetzung letztlich immer auch auf Betriebsebene erfolgen muss. Anpassungsmaßnahmen können mehr oder weniger zwangsläufig (autonom) erfolgen, etwa wenn der Klimawandel die Phänologie der Pflanzen beeinflusst, d. h. zeitliche Veränderungen im Jahresablauf bewirkt und auf diese Weise produktionstechnische Maßnahmen bedingt. Sie können aber auch eine bewusste Entscheidung (geplant) zwischen mehreren Optionen voraussetzen, z. B. Wechsel der Fruchtfolge, der Kulturart oder der Bodenbearbeitung. Aus gesellschaftlicher Sicht erscheint es sinnvoll, „Nutzen“ und „Kosten“ von Anpassungsmaßnahmen nicht nur ökonomisch zu betrachten, sondern auch vor dem Hintergrund einer nachhaltigen Landbewirtschaftung und hinsichtlich einer THG-Reduktion abzuwägen (Band 3, Kapitel 2).

Die Art der Waldbewirtschaftung und der Holznutzung haben großen Einfluss auf den Kohlenstoffkreislauf. Der österreichische Wald stellte bis etwa 2003 eine bedeutende Senke für CO_2 dar; seither ist seine Senkenfunktion geringer und in manchen Jahren nahe Null. Für die Senkenfunktion des Waldes bis 2003 war sowohl das Wachstum der Waldfläche als auch die Steigerung der pro Flächeneinheit gespeicherten Kohlenstoffmenge verantwortlich. Mit Ausnahme der letzten zehn Jahre nahmen in den vergangenen Jahrzehnten die Kohlenstoffvorräte erheblich zu, obwohl die Nutzung kontinuierlich gesteigert wurde, da die Waldfläche insgesamt wuchs, sich die Altersstruktur (Altersgruppen der vorhandenen Bäume) verschob und der Holzeinschlag stets geringer als der Zuwachs war. Der Rückgang der Kohlenstoffsenke erklärt sich daraus, dass die Erntemengen nach dem Jahr 2002 signifikant anstiegen. Der Holzeinschlag stieg ab der Jahrtausendwende bis etwa 2008 stark an und nahm danach wieder etwas ab. Außerdem wurde die Berechnungsmethode verändert: Erstmals wurden die Veränderungen des Bodenkohlenstoffpools (Auflagehumus und Mineralboden) berücksichtigt, wobei der Boden eine leichte Kohlenstoffquelle darstellt (Band 3, Kapitel 2.)

Die THG-Emissionsbilanz von forstlicher Biomasse hängt stark von systemischen Effekten im Forstsystem ab. Zu beachten sind Wechselwirkungen zwischen der eingeschlagenen Holzmenge, der Kohlenstoffsenke des Waldes sowie dem aufgebauten Kohlenstoffvorrat, die je nach Betrachtungszeitraum unterschiedliche Netto-THG-Emissionen ergeben (Abbildung S.3.4, Band 3, Kapitel 2).

Der Ersatz von emissionsintensiven Rohstoffen bzw. Bauteilen in langlebigen Produkten, insbesondere Gebäuden, durch Holz, kann zu einer Steigerung der Kohlenstoffspeicherung in Produkten und gesamthaft zu einer THG-Reduktion beitragen. Die besten Resultate im Hinblick auf die THG-Bilanz bringt eine integrierte Optimierung der Forstwirtschaft, inklusive Forstmanagement, Nutzung von Holz für langlebige Produkte und Nutzung von Nebenprodukten, wie Schwachholz und Abfällen aus Produktion bzw. Produkten am Ende ihrer Lebenszeit für die energetische Nutzung. Eine kaskadische Nutzung von Biomasse stellt in der Forstwirtschaft in vielen Fällen eine ökologisch effektive Nutzungsstrategie dar. Je nach Standort, Baumart, wirtschaftlichen Gegebenheiten usw. kann die Nutzung von Schwachholz als Brennstoff sinnvoll sein. Ein derartiges Nutzungskonzept wird in Österreich derzeit weitgehend verfolgt (Band 3, Kapitel 2).

Die Forstwirtschaft muss langfristig planen – die Anpassung an den Klimawandel stellt für sie daher eine besondere Herausforderung dar. Trotz erheblicher Unsicherheiten müssen bereits heute Entscheidungen gefällt werden, die sich unter geänderten Klimabedingungen bewähren sollen. Als geeignete Strategie in dieser Situation gilt eine Form der Waldbewirtschaftung, die den Forstwirten auch bei unerwarteten Entwicklungen ausreichend Handlungsspielraum verschafft. Als besondere Herausforderungen gelten dabei die großen Unsicherheiten bei der Regionalisierung der Veränderungen, insbesondere der extremen Wetterereignisse, und beim Risiko von Schadinsekten und forstschädlichen Pilzen. Die Wahl der geplanten Umtriebszeit ist ein wichtiger Parameter für Anpas-

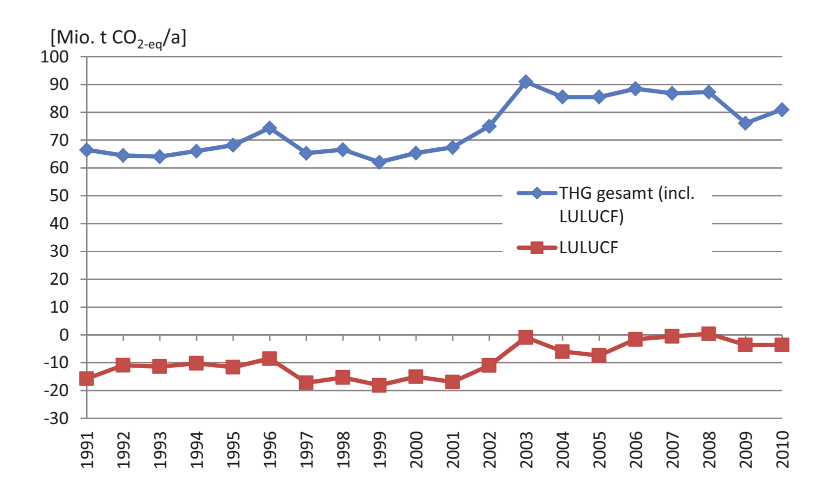


Abbildung S.3.4. THG-Emissionen (inklusive landnutzungsbedingter Quellen/Senken) in Österreich insgesamt und THG-Emissionen des Landnutzungssektors (LULUCF). Quelle: National Inventory Report, Anderl et al. (2012)

Figure S.3.4. Total Austrian GHG emissions (including sources and sinks from land use, land-use change and forestry, LULUCF) contrasted with LULUCF emissions only. Source: National Inventory Report, Anderl et al. (2012)

sungsstrategien insbesondere zur Verringerung des Risikos von Schadereignissen, wobei Wechselwirkungen mit der Kohlenstoffsenkenfunktion des Waldes zu beachten sind. (Band 3, Kapitel 2).

Die Herausforderungen des Klimawandels für die Forstwirtschaft sind regional sehr unterschiedlich. In Regionen, in denen die Produktivität der Wälder derzeit durch die Länge der Vegetationsperiode begrenzt wird, wird die Produktivität der Wälder durch den Klimawandel verbessert. Dies gilt für weite Teile des Bergwaldes sowie für Flächen, die oberhalb der aktuellen Waldgrenze gelegen sind. Bereits bekannte Problemgebiete, wie der sommerwarme Osten und der Nordosten Österreichs, werden in Zukunft noch schwieriger zu bewirtschaften sein, da der Wald in diesen Regionen bereits an der Verbreitungsgrenze der Steppe gelegen ist. Hier ist der Wasserhaushalt der bestimmende Faktor (Band 3, Kapitel 2).

Eine Umfrage ergab, dass die Relevanz des Klimawandels für die Forstwirtschaft von den LeiterInnen österreichischer Forstbetrieben bereits wahrgenommen wird. Mehr als 85 % der BetriebsleiterInnen von größeren Forstbetrieben geben an, bereits Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel umgesetzt zu haben, während KleinwaldbesitzerInnen bisher weniger reagiert haben (Band 3, Kapitel 2).

Die Widerstandskraft von Wäldern gegenüber Risikofaktoren sowie die Anpassungsfähigkeit können erhöht werden. Beispiele für resilienzsteigernde Anpassungsmaßnahmen sind kleinflächigere Bewirtschaftungsformen, standorttaugliche Mischbestände, Sicherstellung der natürlichen Waldverjüngung im Schutzwald durch angepasstes Wildmanagement. Problematisch sind vor allem Fichtenbestände auf Laubmischwaldstandorten in Tieflagen sowie Fichtenreinbestände in den Bergwäldern mit Schutzfunktion. Die Anpassungsmaßnahmen in der Forstwirtschaft sind mit beträchtlichen Vorlaufzeiten verbunden (Band 3, Kapitel 2).

Eine erfolgreiche **Anpassung der Wasserwirtschaft an den Klimawandel** kann durch integrative, interdisziplinäre Ansätze gewährleistet werden. Anpassungsmaßnahmen in den Bereichen Hoch- und Niederwasser, wie etwa bei Landnutzungsänderungen im Einzugsgebiet, können durch Kohlenstoffsequestrierung auch zur THG-Minderung beitragen. Veränderungen des Feststoffhaushaltes durch die global ansteigende Lufttemperatur haben weniger nachteilige Auswirkungen auf Fließgewässersysteme als das fehlende Sedimentkontinuum. In der Trinkwasserversorgung stellen insbesondere die Vernetzung kleinerer Versorgungseinheiten sowie die Schaffung von Redundanzen bei den Rohwasserquellen wichtige Anpassungsmaßnahmen dar. In der Abwasserreinigung liegt die primäre Herausforderung in der Berücksichtigung verminderter Wasserführungen in den empfangenden Gewässern. Eine Erhöhung des organischen Anteils im Boden führt zu einer Steigerung der Speicherkapazität von Bodenwasser. Durch den Schutz und die Ausweitung von Retentionsflächen (z. B. Auen) können Ziele des Hochwasserschutzes und des Biodiversitätsschutzes zur Anpassung an geänderte Abflussverhältnisse kombiniert werden (Band 3, Kapitel 2).

In der Wasserwirtschaft gibt es nur geringe Möglichkeiten zur THG-Reduktion. Im Bereich der Siedlungswasserwirtschaft kann die Errichtung von Faultürmen zur Erzeugung von Biogas bei Kläranlagen von entsprechender Größe zur THG-Reduktion beitragen. Methanemissionen aus bestehenden Stauseen sind schwer zu vermeiden (Band 1, Kapitel 1).

Die Auswirkung der Klimaänderung auf die Energieproduktion der Wasserkraftwerke wird in verschiedenen Studien unterschiedlich beurteilt. Erwartet wird, dass es zu einer jahreszeitlichen Verlagerung der Produktion vom Sommer- auf das Winterhalbjahr kommen wird (Band 3, Kapitel 2).

Der Klimawandel erhöht den Druck auf Ökosysteme und Biodiversität, die schon derzeit durch vielfältige Faktoren

wie etwa Landnutzung oder Immissionen belastet sind. Viele Naturschutzmaßnahmen zur Förderung der Biodiversität können auch zur THG-Reduktion beitragen. Schutz bzw. Restaurierung von Mooren oder Verringerung der Nutzungsintensität in dafür geeigneten Wald- oder Feuchtgebieten schaffen Kohlenstoffsenken und fördern Biodiversität. Derartige Maßnahmen können auch makroökonomisch attraktiv sein, werden aber ohne Anreizsysteme nur in geringem Umfang umgesetzt werden (Band 3, Kapitel 2).

Ökosysteme und biologische Vielfalt sind nicht nur durch den Klimawandel, sondern durch viele andere globale, regionale und lokale Veränderungen bedroht. Negativ können sich etwa die Einbringung gebietsfremder, invasiver Arten, die Deposition von Schadstoffen, die Zerstörung von Lebensräumen durch Bautätigkeit für Siedlungen, Gewerbe, Industrie oder Tourismus, Wassernutzung sowie Land- und Forstwirtschaft auswirken. Maßnahmen in anderen Sektoren haben daher Folgen für Naturschutz, Ökosysteme und Biodiversität, sowohl indirekt (über den Klimawandel), als auch direkt, etwa durch Landnutzung. THG-Minderungsmaßnahmen in anderen Sektoren stellen somit häufig auch Adaptionsmaßnahmen für den Bereich Naturschutz und Biodiversität dar (Band 2, Kapitel 3; Band 3, Kapitel 2).

Steigender Druck auf Ökosysteme und Biodiversität kann zum Verlust der Fähigkeit von Ökosystemen führen, kritische Ökosystemleistungen weiterhin in ausreichender Quantität und Qualität zu liefern. Risiken bestehen insbesondere durch bereits vorhandene Beeinträchtigungen sowie durch klimabedingte Verschiebungen von Arealgrenzen, denen Arten auf Grund von Wanderungsbarrieren, z. B. im alpinen Raum, nicht gewachsen sind. Die Schaffung eines umfassenden Lebensraumverbundes in Österreich stellt eine wichtige Anpassungsoption dar (Band 2, Kapitel 3; Band 3, Kapitel 2).

Es kann auch zu Trade-offs zwischen Klimaschutzmaßnahmen und dem Schutz der Biodiversität kommen. Etwa **im Bereich erneuerbarer Energien treten Konflikte zwischen Klimaschutz und Erhaltung der Biodiversität auf**. Ein weiterer Ausbau der Wasserkraft kann zu einer Verringerung der biologischen Vielfalt in Fließgewässern führen. Eine Zunahme der Flächeninanspruchnahme für den Anbau von Energiepflanzen oder eine intensivere Holznutzung der Wälder kann ihre Funktion als CO_2-Senke vermindern und Auswirkungen auf die Biodiversität haben. Durch frühzeitiges Erkennen möglicher Konflikte zwischen Klima- und Biodiversitätsschutz ist es möglich, das vorhandene Potenzial für Synergien bestmöglich zu nutzen (Band 3, Kapitel 2).

Nachhaltiger Konsum bietet erhebliche THG-Reduktionspotenziale. Nachfrageseitige Veränderungen, etwa eine Veränderung der Konsumgewohnheiten im Bereich Ernährung sowie Maßnahmen zur Reduktion von Lebensmittelabfällen, können erheblich zur THG-Reduktion beitragen. (Band 3, Kapitel 2).

In der EU-25 gehen knapp 30 % der insgesamt durch Konsum verursachten THG-Emissionen auf Lebensmittel zurück. Auf den Konsum von Fleisch- und Milchprodukten entfallen in den EU-27 14 % der gesamten THG-Emissionen. In Österreich dürften die THG-Emissionen durch den Lebensmittelkonsum in einer ähnlichen Größenordnung liegen wie in Deutschland, wo etwa die Hälfte der durch die Ernährung verursachten THG-Emissionen aus der landwirtschaftlichen Produktion stammen, davon etwa 47 % aus der Tierproduktion und ungefähr 9 % aus der Pflanzenproduktion. Die verbleibenden 44 % der THG-Emissionen für Ernährung teilen sich auf Verarbeitung, Handel und Verbraucheraktivitäten wie Kühlung usw. auf (Band 3, Kapitel 2).

Eine Umstellung der Ernährung in Richtung eines deutlich verringerten Konsums tierischer Produkte kann maßgeblich zur THG-Reduktion beitragen. Ein regional und saisonal orientierter, überwiegend auf pflanzlichen Produkten beruhender Ernährungsstil sowie Bevorzugung von Produkten mit niedrigen THG-Emissionen in der Vorleistungskette kann erhebliche THG-Einsparungen bringen. Ein Umstieg auf Produkte aus biologischer Landwirtschaft kann ebenfalls zur THG-Reduktion beitragen, wenn er mit einer Nachfrageveränderung in Richtung pflanzlicher Produkte verbunden ist, die den Flächenmehrbedarf durch die geringeren Erträge kompensiert. Insgesamt wird geschätzt, dass durch eine weitreichende Ernährungsumstellung mehr als die Hälfte der durch Lebensmittelbereitstellung verbundenen THG-Emissionen eingespart werden könnten (Band 3, Kapitel 2). Derartige Verhaltensänderungen haben auch bedeutsame gesundheitsrelevante Nebenwirkungen (Band 2, Kapitel 6).

Die Verringerung von Verlusten im gesamten Lebenszyklus (Produktion und Konsum) von Lebensmitteln könnte einen wichtigen Beitrag zur THG-Reduktion leisten. Allerdings sind die österreichischen Daten zu Lebensmittelverlusten bzw. -abfällen widersprüchlich und wenig robust; das Vermeidungspotential liegt in internationalen Vergleicht teilweise sehr niedrig, es besteht daher erheblicher Forschungsbedarf (Band 3, Kapitel 2).

Systemische Effekte verursachen große Unsicherheiten bei der umfassenden Bewertung der THG-Effekte von Bioenergie; dies betrifft insbesondere direkte und indirekte Effekte von Landnutzungsänderungen. Landnutzungsbezogene THG-Emissionen durch Bioenergieproduktion können positiv oder negativ sein. Sie entscheiden in vielen Fällen darüber, ob der Ersatz von Fossilenergie durch Bioenergie tatsächlich

den erwünschten THG-Einspareffekt erzielt. Die Größe der mit Landnutzungswandel verbundenen THG-Emissionen hängt vor allem von zwei Faktoren ab: (1) der Nutzungsgeschichte des zum Bioenergieanbau verwendeten Landes sowie den Charakteristika der verwendeten Bioenergiepflanzen und (2) den systemischen Effekten wie etwa der Verdrängung des Anbaus von Futter- und Lebensmitteln (indirect land-use change: iLUC). Die Daten- und Modellunsicherheiten, die mit einer Abschätzung von iLUC verbunden sind, rechtfertigen es nicht, systemische Effekte, die mit einem Ausbau der Bioenergie im großen Maßstab verbunden sind, zu ignorieren. Damit würde lediglich implizit angenommen, dass die mit iLUC verbundenen Emissionen Null seien, was in der Regel nicht korrekt ist. Wenn der Ausbau der Bioenergie zur THG-Reduktion beitragen soll, ist es nötig, mit iLUC verbundenen Emissionen bei der Berechnung der THG-Emissionen zu berücksichtigen (Band 3, Kapitel 2).

S.3.3 Energie
S.3.3 Energy

Energie ist vital für unser Wirtschaftssystem und für die Produktion von Gütern und die Bereitstellung von Dienstleistungen; der Energieeinsatz bietet daher zentrale Gestaltungsmöglichkeiten. Während in Österreich der Energieeinsatz pro Wertschöpfung (BIP) seit 1990 praktisch unverändert ist, sank er in anderen Ländern und im EU-Durchschnitt deutlich. Ohne sichtbaren Veränderungstrend wurden in Österreich von 1990 bis 2011 pro Milliarde EUR Bruttoinlandsprodukt (BIP) zwischen 4,8 und 5,5 PJ an Primärenergie eingesetzt. Aus der Sicht des Klimawandels führt dieser Energieeinsatz jedoch zu gravierenden Problemen, geht die Umwandlung von fossiler Primärenergie in Energiedienstleistungen letztendlich mit THG-Emissionen einher.

Für eine Transformation des Energiesystems ist der Fokus auf Energiedienstleistungen entscheidend. Energiedienstleistungen sind die letztlich wohlstandsrelevante Größe. Die Energieproduktivität auf allen Ebenen des Energiesystems bestimmt den Bedarf an Energie, die für die Bereitstellung der Energiedienstleistung erforderlich ist. Der Energieträgermix bestimmt welche Energieträger direkt für den Endverbrauch oder Transformationsprozesse eingesetzt wird. Klimapolitik muss daher sowohl beim Energiebedarf als auch bei Energietechnologien und den Energieträgern ansetzen (Band 3, Kapitel 3; Band 3, Kapitel 6).

Im Jahr 2011 betrug der gesamte Bruttoinlandsbedarf an Primärenergie in Österreich über 1 400 PJ, womit sich der Energieeinsatz seit 1955 mehr als verdreifacht hat (Abbildung S.3.5). Zugleich ist eine Stagnation des Primärenergiebedarfs von 2005 bis 2011 zu erkennen, darunter ein signifikanter Rückgang im Jahr 2009, der auf die geringere Produktion im Zuge der Wirtschaftskrise zurückzuführen ist (Band 3, Kapitel 3).

Innerhalb dieses Zeitraums zeigt sich die Dominanz fossiler Energieträger mit einem ständigen Anteil von mehr als 70 %, was in absoluten Zahlen einen Bedarfsanstieg von ca. 750 PJ (1973) auf ca. 1 000 PJ (2011) bedeutet. Bei fossilen Energieträgern zeigt Kohle sowohl anteilsmäßig also auch absolut (von 245 PJ auf 145 PJ) einen deutlichen Rückgang (Band 3, Kapitel 3).

Der Bedarf an Mineralölprodukten verzeichnet seit 1973 einen Zuwachs von 450 PJ auf aktuell 550 PJ, was ausschließlich auf den Verkehrssektor zurückzuführen ist. In anderen Bereichen (Industrie, Stromerzeugung, Raumwärme) hat die Bedeutung von Erdöl deutlich abgenommen. Gas ist der einzige fossile Energieträger, dessen Anteil sich am Primärenergieverbrauch erhöhte (2011 lag der Anteil mit ca. 350 PJ bei knapp 24 %). In der Gesamtbedeutung stieg der Anteil erneuerbarer Energietechnologien im Jahr 2011 auf 26 %. Historisch betrachtet waren in der Entwicklung des Endenergieverbrauchs die wichtigsten Aspekte der Anstieg der Anteile von Strom (von 17 % im Jahr 1990 auf 23 % im Jahr 2011) und Gas (von 13 % 1990 auf 28 % 2011; Band 3, Kapitel 3).

In Österreich lag der Anteil der energiebedingten THG-Emissionen von 1990 bis 2011 bei ca. 87 % der Gesamtemissionen. Energiebedingte THG-Emissionen sind abhängig von der Nachfrage nach Energiedienstleistungen (Services), der Effizienz der Umwandlungstechnologie und dem spezifischen THG-Emissionsfaktor. Als Ursachen für die hohe THG-Intensität des österreichischen Energiesystems sind vor allem die großen Umwandlungsverluste (ca. 50 %) von Primärenergie zu Nutzenergie, der hohe Anteil THG-emittierender fossiler Energieträger (derzeit ca. 70 % des österreichischen Energieverbrauchs), aber auch die niedrigen Energiepreise zu sehen, welche seit 1965 im Durchschnitt in realer Größe (d. h. kaufkraftbereinigt) gleich geblieben sind. Energiebedingte THG-Emissionen in Österreich stiegen seit 1990 praktisch nur im Verkehrsbereich, wo bis 2005 ein Anstieg auf fast 25 Mio. t CO_2-Äq. sichtbar ist, daraufhin allerdings ein Rückgang bis 2011. Im Haushaltssektor wurde gegenüber 1990 ein Rückgang von ca. 20 % registriert, in allen anderen Bereichen von 1990 bis 2011 nur sehr marginale Veränderungen (Band 3, Kapitel 3).

Der Energiesektor ist besonders aufgrund seines hohen Anteils an THG-Emissionen und wegen der zahlreichen Minderungsmöglichkeiten von großer Klimaschutzrele-

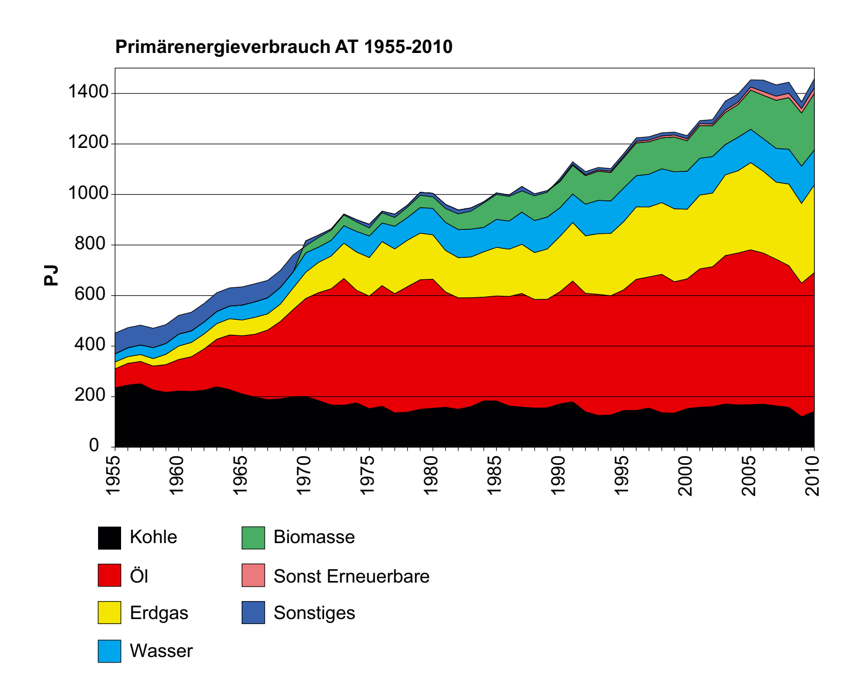


Abbildung S.3.5. Primärenergieaufkommen in Österreich nach Energieträgern 1955 bis 2011. Quelle: Darstellung R. Haas. Daten der Energy Economics Group und Statistik Austria (2013)

Figure S.3.5. Primary energy production in Austria by energy sources. Source: Graph by R. Haas based on data of the Energy Economics Group and Statistik Austria (2013)

vanz. Es bieten sich auch einige synergetische Maßnahmen an, die eine gleichzeitige THG-Reduktions- und Anpassungswirkung erzielen (z. B. passive Maßnahmen zur Reduktion der Kühllast von Gebäuden, Photovoltaik als Kapazitätsbeitrag im Sommer).

Die wichtigsten Optionen zur Minderung von THG Emissionen für die einzelnen Abschnitte der Energiekette sind folgende:

Energieaufbringung: Zur Reduktion von THG-Emissionen beim Primärenergieeinsatz bieten sich grundsätzlich die Nutzung erneuerbarer Energiequellen, allenfalls auch der Einsatz von Carbon Capture & Storage (CCS)-Technologien sowie die Nutzung der Atomkraft an.

In Österreich stehen die Einsatzmöglichkeiten der beiden letztgenannten Optionen nicht zur Diskussion, demzufolge wird hier nur die Nutzung erneuerbarer Energie erörtert. Das Potential aller verfügbaren erneuerbaren Energiequellen in Österreich bis 2050 liegt bei ca. 170 TWh bzw. 610 PJ pro Jahr, wobei besonders Biomasse, Wind und Photovoltaik einen deutlich größeren Beitrag als heute liefern können (Band 3, Kapitel 3).

Energieumwandlung und -übertragung: Szenarioabhängig kann im Bereich der Stromerzeugung bis 2050 eine bis zu 100 %ige Abdeckung durch erneuerbare Energietechnologien erreicht werden. Der Markteintritt von erneuerbaren Energietechnologien stellt momentan die bedeutendste Veränderung im Stromerzeugungsbereich dar. Wegen der derzeit kontinuierlich sinkenden Kosten, insbesondere der Photovoltaik, ist in nächster Zeit weiterhin mit einem deutlichen Anstieg der Erneuerbaren zu rechnen. Dies wird in den nächsten Jahren auch das gesamte österreichische Marktsystem verändern, indem temporär sehr große Strommengen aus diesen Anlagen produziert und die Eigenverbrauchsanteile erhöht werden, zugleich aber auch Stromspeichern und Smart Grids eine bedeutendere Rolle im Stromsystem zukommen wird als derzeit (Band 3, Kapitel 3).

Infrastrukturveränderungen und Strukturanpassungen bei der Erzeugung, den Netzen und der Speicherung sind zur Optimierung dieser Entwicklung des Energiesystems notwendig, und bei maßvoller Weiterentwicklung der energiepolitischen Rahmenbedingungen und Einsatz von dezentralen Erneuerbaren Energieträger-Technologien im Erzeugungsbereich, von Smart-Grids auf Verteilnetzebene sowie neuen Stromspeichertechnologien und -kapazitäten sowie Smart-Meters bei den Verbrauchern durchaus erreichbar – sieht man von möglichen gesellschaftspolitischen Bedenken, u. a. hinsichtlich des Datenschutzes und des Schutzes der Privatsphäre ab (Band 3, Kapitel 3).

Im Bereich der Wärmenetze werden bereits Veränderungen registriert: nach thermischer Sanierung mit Fernwärme versorgte Gebäude weisen Wärmenetze mit sehr geringer Wärmedichte auf; gleichzeitig bergen Wärmenetze das Potenzial, den Übergang zu erneuerbarer Wärmeversorgung zu ermöglichen (Band 3, Kapitel 3; Band 3, Kapitel 5).

Energienutzung: Verbraucherseitige Optionen zur Energiebedarfsreduktion sind qualitativ hochwertige thermische Sanierungen des Gebäudebestands zur Wärmeversorgung und Klimatisierung von Wohngebäuden sowie eine stärke-

re optimierte Einbindung von Erneuerbaren. Im Sinne des Klimaschutzes und der Energieeffizienz kann die derzeitige Entwicklung zunehmend ambitionierter Neubaustandards einen wichtigen Beitrag leisten, sodass unter diesen Rahmenbedingungen thermisch signifikant verbesserte Gebäude bis 2050 etwa 70 % des Wärmebedarfs durch Erneuerbare decken könnten und hier ein breites Portfolio aus Biomasse, Solarthermie und Erdwärme zum Einsatz käme (Band 3, Kapitel 3; Band 3, Kapitel 5).

Beim Stromverbrauch existiert in Österreich ein beträchtliches Energieeinsparpotenzial, wobei Studien klar belegen, dass dieser ohne gravierende politische Eingriffe mit einem Portfolio an wirksamen Maßnahmen weiter deutlich ansteigen wird (Band 3, Kapitel 3).

Optionen zur Anpassung an den Klimawandel: Der Anpassungsbedarf des Energiesektor an den Klimawandel betrifft vor allem die Klimaabhängigkeit der Erneuerbaren, den erhöhten Kühlbedarf von Wärmekraftwerken und Verschiebungen der Energienachfrage durch veränderten Heiz- und Kühlbedarf. Speziell bei der Wasserkraft spielen in Österreich potentielle Auswirkungen des Klimawandels aufgrund veränderter Niederschlagsmengen und –muster (vor allem auch jahreszeitliche Verschiebungen) sowie veränderter Abflussmengen durch erhöhte Verdunstung eine besondere Rolle. Dies kann auch konventionelle thermische Kraftwerke indirekt über die Verfügbarkeit von Kühlwasser betreffen. Dem könnte durch Veränderungen an Turbinen oder an Staubecken begegnet werden, um entweder die energetischen Erträge zu sichern oder sogar zu erhöhen.

Energiepolitische Instrumente: Zur Umsetzung der Minderungsmaßnahmen bedarf es energiepolitischer Instrumente, welche sich aus den analysierten Studien und Szenarien im folgenden Portfolio zusammenfassen lassen (Band 3, Kapitel 3).

- *CO_2-bezogene Energiesteuer:* Zentrales Instrument der meisten Policy-Studien ist die Einführung von kontinuierlich wachsenden Energiesteuern zur effektiven Reduktion der THG-Emissionen, kombiniert mit Anreizen zum Umstieg auf CO_2-arme Energieträger und Steigerung der Energieeffizienz; dies bedeutet eine Senkung des Energieverbrauchs, aber auch vermehrte Investitionen in energieeffiziente Geräte, Kraftfahrzeuge und Anlagen. Der Wettbewerb am Energiemarkt und der damit verbundene Umstieg auf kostengünstigere (erneuerbare) Energien führen dazu, dass z. B. biogene Energieträger, Wasserstoff oder Strom für E-Fahrzeuge nicht mehr aufwendig subventioniert werden müssen. Langfristig resultieren Umweltvorteile aus der durch niedrigere Besteuerung dieser Kraftstoffe erreichten Nachfrageverschiebung.
- *Standards:* Speziell dynamische Höchstverbrauchsstandards stellen in verschiedenen Bereichen wichtige Instrumente dar: Eine Verschärfung thermischer Gebäudestandards für bestehende Gebäude, die Realisierung thermischer Standards für Neubauten (entsprechend Plusenergiehäusern), verschärfte Standards für Elektrogeräte in Haushalten und im Dienstleistungsbereich (Bürogebäude) und rigorose Verschärfung der Standards bezüglich der CO_2-Emissionen verschiedener alternativer Energieträger sind wesentliche Vorgaben zur Reduktion und Optimierung des Energiekonsums.
- *Andere Anreizsysteme:* Subventionen sind vor allem in jenen Bereichen zielführend, in denen die finanzielle Förderung für Erneuerbare bevorzugt über Einspeistarife bzw. Marktprämienmodelle vorgenommen wird, vor allem solange es keine Steuern gibt, die alle Externalitäten berücksichtigen; zusätzlich sind Anreize für die zunehmende Marktintegration von Erneuerbaren, sowohl bei Strom als auch bei Wärme und Mobilität hilfreich, ebenso wie Zuschüsse zur Wohngebäudesanierung und eindeutige Anreiz- und Informationssysteme (z. B. Labeling-Systeme) zur Eliminierung von unrentablen Altgeräten.
- *Soft knowledge and skills:* Die Anhebung des allgemeinen Wissensniveaus bezüglich eines sparsamen Energieeinsatzes ist nötig zur Bekämpfung von Energiearmut und für gezielte Gerätetausch- und Sanierungsaktionen. Verbesserte Beratung für Heizungstausch, Elektrogeräte und Gebäudesanierung zählen auch zu den soft knowledge and skills. Besonders im Wohngebäudebereich gibt es hohen Bedarf an Auditing- und Monitoringaktivitäten zur sukzessiven Auffindung von energetischen Schwachstellen.

Fazit. Folgende grundsätzliche Ansätze existieren, um im Energiesektor THG-Emissionen zu senken:

- Reduktion des Bedarfs an Energiedienstleistungen, z. B. Heizung / Kühlung, Elektrogeräte, PKW-Nutzung).
- Verbesserung der Effizienz in der Energiekette, d. h. effizientere Bereitstellung der gesamten Energiedienstleistungsnachfrage, z. B. effizientere Elektrogeräte, geringere Kraftstoffintensität von Fahrzeugen bei gleicher Leistung und Serviceniveau).
- Bereitstellung der gesamten Energiedienstleistungsnachfrage mit einem CO_2-ärmeren Mix an Energieträgern, z. B. durch Umstieg auf erneuerbare Energieträger.

Studien mit ambitionierten Energie- oder THG-Emissionsreduktionsszenarien gehen davon aus, dass im Schnitt die Nutzung von Erneuerbaren bis 2050 auf eine Größenordnung von zumindest 600 PJ gesteigert werden kann. Wenn es gleichzeitig gelingt den Gesamtenergieverbrauch auf das aus Erneuerbaren bereitstellbare Niveau zu senken, wäre eine THG-freie Energieversorgung bis 2050 erreichbar (Band 3, Kapitel 3).

Abschließend sei festgestellt: Nur wenn letztlich ein abgestimmter Mix dieser einzelnen Maßnahmen umgesetzt wird, ist es möglich, das THG-Reduktionspotenzial in Österreich bis 2050 unter Berücksichtigung gesellschaftlich vorgegebener Rahmenbedingungen weitgehend zu erschließen (Band 3, Kapitel 3; Band 3, Kapitel 6).

S.3.4 Verkehr
S.3.4 Transport

Von allen Sektoren sind in den letzten beiden Dekaden die THG-Emissionen im Verkehr mit +55 % am stärksten gestiegen. Die in den letzten Jahren auf EU-Ebene forcierten regulativen Instrumente – im Wesentlichen Standards für CO_2-Emissionen pro zurückgelegtem km – haben lange Zeit nicht die gewünschten Erfolge gezeigt. Die Gründe dafür waren, dass die gesteigerte Effizienz der PKWs zu einem Großteil durch höhere Fahrleistungen (= gefahrene km) und größere/schwerere PKWs kompensiert wurden (Band 3, Kapitel 3).

Geht man – ohne zusätzliche Maßnahmen – von der in der österreichischen Verkehrsprognose 2025+ abgebildeten steigenden Verkehrs- und Fahrleistung (Fzgkm) aus, und unterlegt bereits (auf EU-Ebene sowie national) beschlossene technische Vorschriften, so ist davon auszugehen, dass die CO_2-Emissionen in den nächsten Jahren weiter ansteigen. Die vereinbarten technischen Grenzwerte führen erst ab Mitte dieses Jahrzehnts zu einem Rückgang der CO_2-Emissionen, die dann 2030 noch 12 % über dem Wert des Jahres 1990 liegen. Im Jahr 2030 werden ca. 45 % der CO_2-Emissionen des Verkehrs von PKWs und etwa 35 % im Straßengüterverkehr emittiert (alle Werte ohne Berücksichtigung des Flugverkehrs; Band 3, Kapitel 3).

Bereits beobachtbar sind die durch die Begrenzung des CO_2-Ausstoßes pro gefahrenem Kilometer für PKWs und Lieferwagen bewirkten ersten Erfolge. Auch Angebotsänderungen im öffentlichen Verkehr und (spürbare) Preissignale hatten nachweisliche Auswirkungen auf den Anteil des Individualverkehrs in Österreich (Abbildung S.3.6, Band 3, Kapitel 3).

Um eine deutliche Reduktion der THG-Emissionen des Personenverkehrs zu erzielen, ist ein umfassendes Maßnahmenpaket notwendig. Zentral sind dabei eine deutliche Reduktion des Einsatzes fossiler Energie, eine Erhöhung der Energieeffizienz sowie die Veränderung des Nutzerverhaltens. Voraussetzung hierfür sind verbesserte Wirtschafts- und Siedlungsstrukturen, in denen die Wegstrecken minimiert sind. Dies kann zur Stärkung umweltfreundlicher Mobilitätsformen, wie Zufußgehen und Radfahren genutzt werden. Öffentliche Verkehrsmittel wären auszubauen und zu verbessern, sowie deren CO_2-Emission zu minimieren. Technische Maßnahmen für den PKW-Verkehr beinhalten weitere massive Effizienzsteigerungen bei den Fahrzeugen oder beim Einsatz alternativer Antriebe – vorausgesetzt die dafür notwendige Energie wird ebenfalls emissionsarm produziert (Band 3, Kapitel 3).

Der Güterverkehr, gemessen in Tonnenkilometern, nahm in Österreich in den letzten Dekaden stärker zu als das Bruttoinlandsprodukt. Die weitere Entwicklung der Transportnachfrage ist durch eine Reihe wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Rahmenbedingungen gestaltbar. Optimierung der Logistik und Stärkung CO_2-effizienterer Verkehrsmittel sind zwei Steuerungsmöglichkeiten. Eine Reduktion der THG-Emissionen pro Tonnenkilometer kann durch alternative Antriebe und Treibstoffe, Effizienzsteigerungen sowie durch eine Verlagerung hin zum Schienenverkehr erreicht werden (Band 3, Kapitel 3).

Substantielle Reduktionen der THG-Emissionen im Verkehrsbereich verlangen ein abgestimmtes Portfolio politischer Maßnahmen, welche neben der Verkehrsvermeidung (Reduktion der zurückgelegten Distanz), den Umstieg auf effiziente Verkehrsträger (öffentlicher Verkehr) sowie den Einsatz von „Zero-Emission"-Fahrzeugen und regenerativer Energie beinhalten (Abbildung S.3.7). Zentraler Aspekt sind geeignete ökonomische Rahmenbedingungen, also neue Preis- (für den motorisierten Individualverkehr) und Tarifsysteme (für den öffentlichen Verkehr) als Anreiz zum Umstieg vom motorisierten Individualverkehr auf öffentlichen Verkehr und auf Zero-Emission-Fahrzeuge (Band 3, Kapitel 3).

Raumplanungsmaßnahmen können zur Reduktion der Fahrzeugkilometer (Personen- und Güterkilometer) im Verkehr beitragen, indem sie es ermöglichen, die menschlichen Grundbedürfnisse (Wohnen, Arbeiten, Bildung, Erholung, Gemeinschaft) und wirtschaftlichen Austauschprozesse in geringerer räumlicher Distanz zu erfüllen. Mehr Effizienz im Autoverkehr wird auch mittels höherer Besetzungsgrade (Fahrgemeinschaften, weniger Leerfahrten, weniger Parksuchverkehr etc.) erreicht (Band 3, Kapitel 3).

Die Reduktion fossiler Energie setzt Verbrennungsmotoren mit geringerem Verbrauch voraus oder Maßnahmen, die Fahrzeuge fördern, welche einen geringeren CO_2-Austoss aufweisen

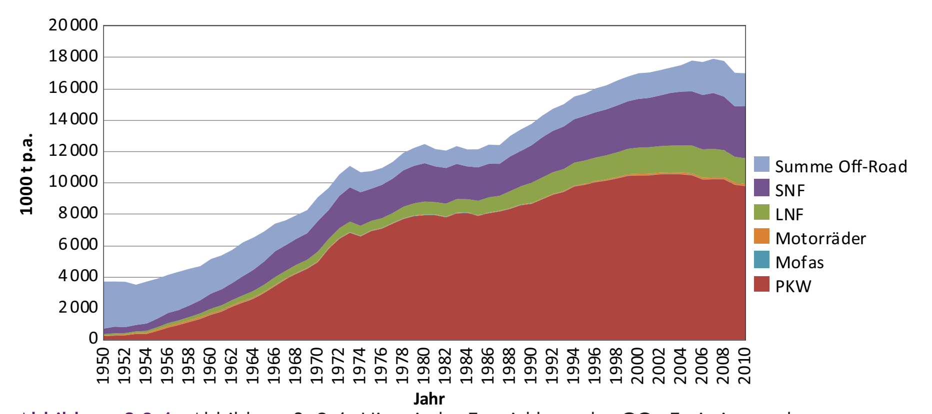


Abbildung S.3.6. Abbildung S. 3.6: Historische Entwicklung der CO_2-Emissionen des gesamten österreichischen Verkehrs 1950 bis 2010. LNF = Leichte Nutzfahrzeuge (Lieferwagen und LKWs <3,5 t Gesamtmasse); SNF = Schwere Nutzfahrzeuge (LKWs >3,5 t Gesamtmasse sowie Busse); Off-Road = Eisenbahn (Dampf- und Dieseltraktion, Baumaschinen, Landwirtschaftliche Maschinen, Rasenmäher etc.). Quelle: Hausberger und Schwingshackl (2011)

Figure S.3.6. Historical development of CO_2-emissions in transport from 1950 to 2010 in Austria; LNF = light commercial vehicles (<3.5 t total weight); SNF = heavy duty vehicles (>3.5 t total weight and buses); Off-road = trains (steam and diesel traction, construction machines, agricultural machines, lawnmowers, etc.). Source: Hausberger and Schwingshackl (2011)

(wie z. B. e-Mobilität, gespeist aus Erneuerbaren), bzw. einen energieeffizienteren Verkehrsfluss vorsehen (Band 3, Kapitel 3).

Raumplanung: Aus Sicht der Raumplanung sind die größten Anpassungserfolge für den Alpenraum zu erwarten, indem generell Planungsinstrumente weiterentwickelt werden und ländergrenzen- und sektorenübergreifend zusammengearbeitet wird. Der daraus resultierende Wissenstransfer und die einhergehende Bewusstseinsbildung sollen Wege zur Entwicklung belastbarer Siedlungs- und Infrastrukturen bieten, ebenso wie Schutz vor Naturgefahren, optimale Verwaltung von Wasser und anderer Ressourcen, welche die Landschaftsentwicklung und Freiraumsicherung nachhaltig gewährleisten und darüberhinaus auch im Tourismusbereich eine Neuorientierung bewirken (Band 3, Kapitel 3).

Finanzwirtschaftlicher Bereich (Steuern und Subventionen): In Bezug auf neue Bepreisungssysteme für den motorisierten Individualverkehr sehen alle untersuchten Studien ähnliche Prioritäten: Vor allem eine kontinuierlich ansteigende (CO_2-basierte) Kraftstoffsteuer, ergänzt durch eine verbrauchsabhängige Zulassungssteuer, die den Trend zu größeren Fahrzeugen vermindern soll und somit eine bessere Effizienz gewährleisten, kann Wirkung zeigen. Hierfür können unterstützend wirken „Road-Pricing" in großen Städten, die Abschaffung von Vergünstigungen wie die bevorzugte Behandlung von Dienstfahrzeugen, eine aufkommensneutrale Umgestaltung der Pendlerpauschale, die Entwicklung neuer Konzepte und Intensivierung der Parkraumbewirtschaftung und die Tarifvereinfachung im öffentlichen Verkehr sowie systematischer Ausbau der Anreizsysteme für Zeitkarten (Band 3, Kapitel 3).

Wissenschaftlich belegt sind außerdem die signifikanten Auswirkungen bei einer Verteuerung von energie- und THG-intensiven Mobilitätsformen zugunsten einer Reduktion der Fahrleistung und/oder eine Verlagerung auf andere Verkehrsmittel, bzw. den öffentlichen Verkehr (Band 3, Kapitel 3).

Verkehrsplanung und „Soft tools": Zur Verkehrsverlagerung im Personenverkehr bedarf es des Ausbaus und weiterer Anreize für den ÖV, eines besseren Mobilitätsmanagements in Betrieben, der Förderung des Radverkehrs (Bau neuer Strecken, Lückenschlüsse in bestehenden Radverkehrsnetzen, Fahrradabstellplätze) sowie überzeugender Öffentlichkeitsarbeit (Band 3, Kapitel 3; Band 3, Kapitel 6).

Der Güterverkehr benötigt zur Umsetzung einer Verkehrsverlagerung eine verbesserte Logistik, eine höhere Auslastung der Transportmittel (gewichts- und volumenmäßig) und die Erhöhung der Attraktivität bei der Nutzung von Bahn und Binnenschiff (Donau) durch Ausbau der Bahnstrecken und -anschlüsse sowie der Schifffahrtinfrastruktur (Band 3, Kapitel 3).

Technische Lösungsansätze alternativer Antriebstechnologien, alternativer Energieträger und Effizienzsteigerungen konventioneller „Fahrzeuge": Effizientere Technologien umfassen vor allem den erhöhten Einsatz alternativer Kraftstoffe und den steigenden Anteil elektrisch betriebener PKWs und LNF sowie die Reduktion spezifischer CO_2-Emissionen von „Bio-Kraftstoffen", sodass sie bis 2020 70 % weniger als fossile Kraftstoffe ausstoßen. Das Ausmaß der Reduktion wird durch Emissionen bei der Herstellung der Kraftstoffe eingeschränkt, sodass der großskalige Einsatz von Biokraftstoffen zunehmend in Frage gestellt wird (Band 3, Kapitel 3; Band 3, Kapitel 3).

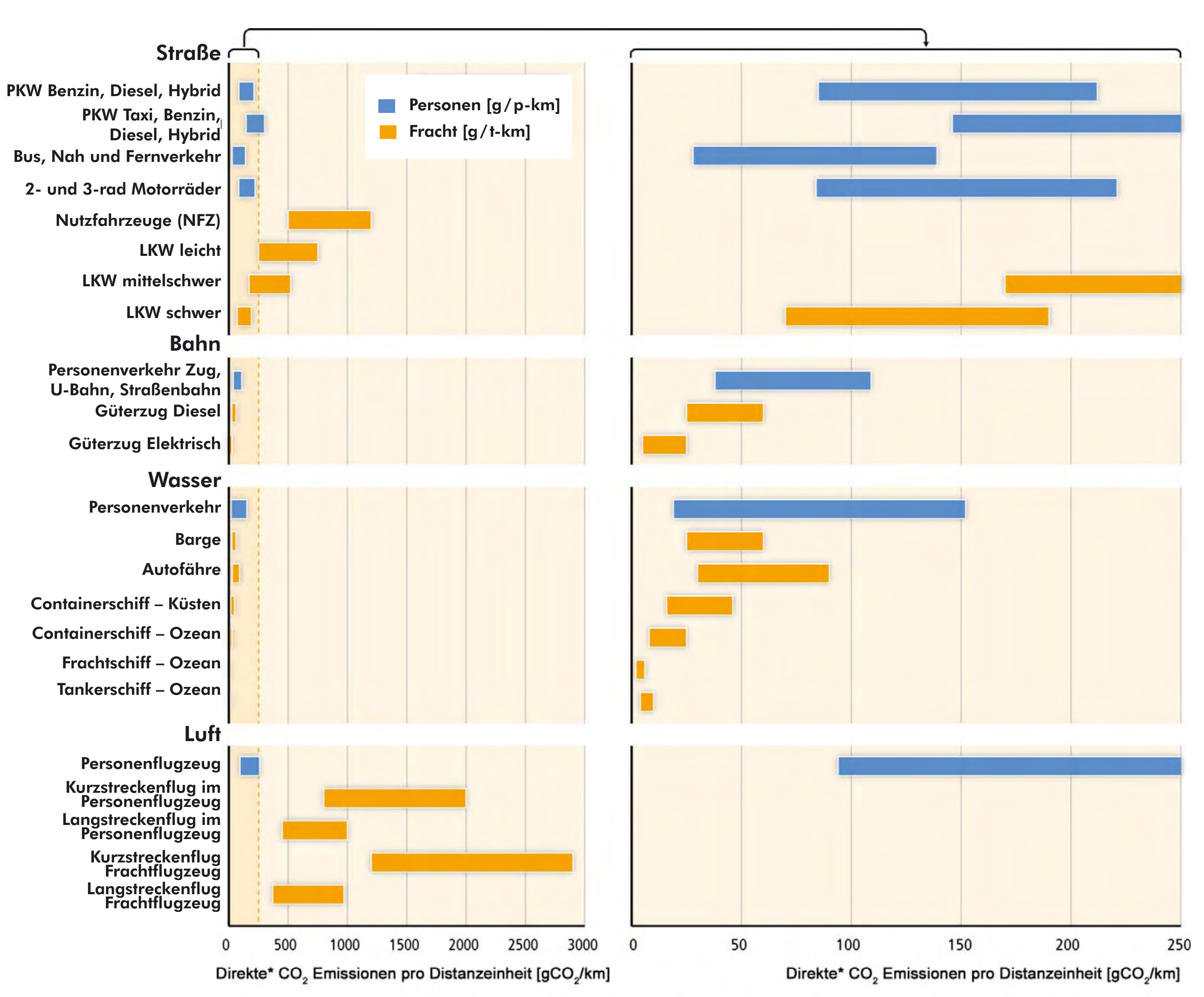


Abbildung S.3.7. Typische direkte CO_2-Emissionen pro Passagierkilometer und pro Tonnenkilometer für Fracht und für die Hauptverkehrsträger, wenn fossile Brennstoffe benutzt werden, und thermische Stromerzeugung für den Eisenbahnverkehr benutzt wird. Quelle: IPCC (2014)

Figure S.3.7. A comparison of characteristic CO_2-emissions per passenger-kilometer and ton-kilometer for different transport modes that use fossil energy and thermal electricity generation in the case of electric railways. Source: IPCC (2014)

Die Relevanz alternativer Kraftstoffe (Bio-Kraftstoffe, Wasserstoff, Erdgas) wird zumindest bis 2030 in moderatem Rahmen bleiben. Eine Elektrifizierung im straßengebundenen Güterverkehr ist derzeit nicht sinnvoll darstellbar, deshalb stellen Biokraftstoffe hier ebenso wie bei mobilen Maschinen derzeit die wesentliche Alternative dar (Band 3, Kapitel 3).

S.3.5 Gesundheit
S.3.5 Health

Der österreichische Gesundheitssektor kann wesentlich zu einer klimagerechten Transformation beitragen. Das österreichische Gesundheits- und Sozialwesen beschäftigt ca. 10 % aller Erwerbstätigen und produziert ca. 6 % der österreichischen Brutto-Wertschöpfung, wobei dieser Anteil weiter wächst. Diese wichtige Rolle im österreichischen Wirtschaftsgefüge bedingt auch eine hohe Verantwortung des Sektors für

die nachhaltige Erbringung der Wirtschaftsleistungen. Weil ökologische Nachhaltigkeit für die langfristige Förderung und Erhaltung der Gesundheit bedeutsam ist, kommt dem Gesundheitssektor darüber hinaus eine wichtige Vorbildwirkung zu, die dessen Verantwortung im Klimaschutz weiter unterstreicht (Band 3, Kapitel 4).

Viele Maßnahmen im Gesundheitswesen sind nicht spezifisch für diesen Sektor entwickelt worden, sondern sind Teil sektoraler Strategien. Maßnahmen wie hohe thermische Gebäudestandards, effizientes Energiemanagement, Umstieg auf erneuerbare Energieträger besitzen auch im Gesundheitssektor ein nennenswertes Reduktionspotenzial (siehe Strategien im Kapitel „Gebäude“), wie einige Vorreiter bereits deutlich demonstrieren. Das Gesundheitswesen hat zudem insbesondere in den Bereichen Mobilität, umwelt- und ressourcenschonende Beschaffung und klimafreundliche Abfallwirtschaft Gestaltungsmöglichkeiten bezüglich der Emissionsreduktion. Die Schaffung von Anreizen für PatientInnen und MitarbeiterInnen klimafreundliche Verhaltensweisen anzunehmen kann dabei einen wesentlichen Beitrag leisten (Band 3, Kapitel 4).

Anpassung im Kontext der Gesundheit bezieht sich einerseits auf institutionelle und private, geplante Maßnahmen und andererseits auf biologisch-physiologische Prozesse. Letztere sind automatische und unbewusste Vorgänge des individuellen menschlichen Körpers und laufen auf verschiedenen Ebenen und mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten ab. Diesbezüglich wesentlich ist das Wissen um bestehende Grenzen solcher Anpassungsprozesse sowie um gefährdete Risikogruppen, die aufgrund verschiedener Faktoren (Alter, Vorerkrankungen, soziale Faktoren etc.) eingeschränkte Anpassungsfähigkeiten aufweisen. Während biologisch-physiologische Prozesse eher Reaktionen auf kurzfristige Wetterereignisse ermöglichen, können institutionelle Anpassungsstrategien helfen auf langfristige Änderungen zu reagieren sowie sich der oben genannten Risikogruppen anzunehmen (Band 2, Kapitel 6; Band 3, Kapitel 4).

Das Gesundheitswesen ist daher ein zentrales Element in einer Verbesserung der Anpassungsfähigkeit an mögliche gesundheitsrelevante Folgen des Klimawandels. Besonders Risikogruppen, die aufgrund von Alter oder Vorerkrankungen sensibel auf klimatische Änderungen reagieren, können so rechtzeitig unterstützt werden. Ein nachhaltiges Gesundheitswesen setzt zudem auf Prävention statt Behandlung und Heilung von Krankheiten. Eine solche Transformation erfordert eine strukturelle Änderung des gesamten Systems (Band 3, Kapitel 4).

Bedrohungen durch neu eingeschleppte oder etablierte Krankheitserreger und Vektoren sind praktisch nicht voraussagbar und die Möglichkeiten, prophylaktische Gegenmaßnahmen zu ergreifen, sind gering. Sie stellen daher eine große Herausforderung für das Gesundheitssystem dar (Band 2, Kapitel 6). Kontinuierliche, detaillierte Erhebung und Überwachung von Gesundheitsdaten, die regelmäßig mit Klima- und Ausbreitungsdaten in Beziehung zu setzen sind, stellen eine wichtige Voraussetzung für die Entwicklung gezielter Anpassungsstrategien dar. Bisher sind diesbezügliche Untersuchungen zeitlich punktuell und räumlich auf wenige Regionen Österreichs beschränkt (Band 3, Kapitel 4).

Eine Barriere ist in diesem Zusammenhang die eingeschränkte Verfügbarkeit von Daten. Obwohl das Gesundheitssystem bereits jetzt routinemäßig gesundheitsrelevante Daten sammelt sind diese nicht oder nicht in ausreichendem Detailgrad für die wissenschaftliche Forschung zugänglich. Datenschutzrechtliche Bedenken, unklare Kompetenzen, mangelhafte Kooperationsbereitschaft sowie technische Probleme behindern derzeit eine hinreichende Übermittlung der Daten, ohne die aussagekräftige und detaillierte Analysen der regionalen und lokalen Dosis-Wirkungs-Beziehungen und darauf aufbauende Konzepte für Anpassungsmaßnahmen nur schwer zu erstellen sind (Band 3, Kapitel 4).

Gesundheitsrelevante Anpassung betrifft jedenfalls auch vielfach individuelle Verhaltensänderungen von entweder einem Großteil der Bevölkerung oder von Angehörigen bestimmter Risikogruppen (Band 3, Kapitel 4).

Schließlich ist darauf hinzuweisen, dass auch Anpassungs- und Klimaschutzmaßnahmen in anderen Bereichen für die Gesundheit des Menschen von Bedeutung sein können. Hier gilt es auf der einen Seite negative Feedbacks zu vermeiden und auf der anderen Seite Synergieeffekte zu nutzen (Band 3, Kapitel 4).

Klimarelevante Transformation geht oft direkt mit gesundheitsrelevanten Verbesserungen und einer Erhöhung der Lebensqualität einher. Für den Wechsel vom Auto zum Fahrrad beispielsweise wurden eine positiv-präventive Wirkung auf das Herz-Kreislaufsystem und weitere signifikant positive Gesundheitseffekte nachgewiesen, welche die Lebenszeit statistisch signifikant ansteigen lassen, neben den positiven Umweltwirkungen für die Gesamtgesellschaft. Zusätzliche gesundheitsfördernde Wirkungen wurden ebenso für nachhaltige Ernährung (z. B. wenig Fleisch) nachgewiesen. Aufgrund der existierenden Feedbackeffekte erhöht es die Gesamteffektivität, wenn GesundheitsexpertInnen ein Mitspracherecht bei der Gestaltung und Planung relevanter Maßnahmen außerhalb des Gesundheitssystems eingeräumt wird. Dies alleine würde es ermöglichen Maßnahmen so zu konzipieren, dass sie vorteilhaft für die Gesundheit sind oder zumindest die positiven Effekte überwiegen (Band 3, Kapitel 4).

S.3.6 Tourismus
S.3.6 Tourism

Weltweit wird der jährliche Beitrag des Tourismus an den gesamten CO_2-Emissionen infolge von Transport (Herkunft-Zielort), Beherbergung und Aktivitäten (vor Ort) auf rund 5 % geschätzt. Mit 75 % entfällt ein Großteil der tourismusverursachten CO_2-Emissionen auf den Touristentransport, gefolgt von der Beherbergung mit 21 % (Abbildung S.3.8, Band 3, Kapitel 4).

Auch für Österreich ist davon auszugehen, dass der Tourismussektor für einen hohen Anteil der THG-Emissionen verantwortlich ist, da er einen bedeutenden Wirtschaftszweig des Landes darstellt. Im Jahr 2010 trug der Tourismus unter Berücksichtigung indirekter Effekte 7,45 % zur Gesamtwertschöpfung bei. Bislang fehlen allerdings weitgehend genauere Untersuchungen zu den Emissionen des heimischen Tourismussektors, eine detaillierte Erfassung findet sich bislang nur im Bereich des schneebasierten Wintertourismus. Als größter Emittent wird dort die Beherbergung mit einem Anteil von 58 % identifiziert, gefolgt vom An-/Abreise- und Zubringerverkehr mit 38 %. Seilbahnen, Schlepplifte, Pistengeräte und Schneekanonen sind hingegen nur für 4 % der gesamten schneebasierten Wintertourismusemissionen verantwortlich (Band 3, Kapitel 4).

Ein hohes Einsparungspotential in Bezug auf tourismusverursachte THG-Emissionen wird somit im Transportwesen und im Beherbergungsbereich gesehen und kann zudem durch Anpassung des betrieblichen Managements von touristischen Anlagen erzielt werden.

Erfolgreiche PionierInnen im nachhaltigen Tourismus zeigen Wege der THG-Emissionsreduktion in dieser Branche auf. In Österreich gibt es Vorzeigeprojekte auf allen Ebenen – Einzelobjekte, Gemeinden und Regionen – sowie in verschiedenen Bereichen, wie Hotellerie, Mobilität, touristisches Angebot. Aufgrund der langfristigen Infrastrukturinvestitionen ist der Tourismus für „Lock-in Effekte“ besonders anfällig (Band 3, Kapitel 4).

Veränderungen des Klimas wirken sich sehr stark auf die österreichische Tourismusbranche aus. Dies liegt an der besonders großen Abhängigkeit von den örtlichen klimatischen Bedingungen. Zieht man den derzeitigen Wissensstand hinsichtlich zukünftiger Entwicklung des Klimas in Betracht, so ist davon auszugehen, dass die Konsequenzen sowohl negativer als auch positiver Natur sein werden. Die Gewährleistung einer langfristigen und nachhaltigen Entwicklung des Tourismussektors geht mit einem rechtzeitigen Erkennen von Vor- und Nachteilen des Klimawandels sowie einer darauf aufbauenden Anpassungsstrategie einher.

Die verschiedenen Bereiche des österreichischen Tourismus werden unterschiedlich stark vom Klimawandel betroffen sein. Es wird erwartet, dass zum Beispiel **der Städtetourismus netto im Jahresverlauf kaum, wohl aber saisonal betroffen** sein wird. Im Sommer sind sind Rückgänge im Städtetourismus aufgrund vermehrter Hitzetage und tropischer Nächte möglich. Verlagerungen der Touristenströme in andere Saisonen und Regionen sind möglich und derzeit schon beobachtbar. Für alpine Badeseen könnte sich der Klimawandel sogar als vorteilhaft herausstellen. Besonders negative Effekte sind hingegen für den Neusiedler See – dessen Wasserspiegel voraussichtlich deutlich sinken wird – den Bergtourismus und den alpinen Wintertourismus zu erwarten. Für den Bergtourismus ist vor allem der Rückgang des Permafrostes und der Rückgang von Gletscherzungen bereits heute ein großes Problem, da dadurch bestehende Wege instabil oder von Steinschlag bedroht werden. Neben Anpassung, Neubau und Instandhaltung bestehender Hüttenzugänge, Höhenwanderwege und Übergänge zur Reduzierung bzw. Vermeidung unverhältnismäßiger Risiken beinhalten Maßnahmen zur Anpassung im Bergtourismus auch das Auflassen oder die Neuanlage von Wegen sowie die Einrichtung von Wege-Informationssystemen (Band 3, Kapitel 4).

Der Wintertourismus wird durch den stetigen Temperaturanstieg weiter unter Druck kommen. Im Vergleich mit naturschneesicheren Destinationen drohen vielen österreichischen Schigebieten Nachteile durch steigende Beschneiungskosten. Besonders bedeutend sind daher aus österreichischer Sicht Anpassungsmaßnahmen hinsichtlich des alpinen Wintertourismus. Das liegt einerseits an der Klimasensitivität des Wintertourismus durch die Abhängigkeit von Schnee und andererseits an der wichtigen Stellung des Wintertourismus in der heimischen Tourismuswirtschaft. Während sich nämlich die Nächtigungszahlen in Österreich im Sommer- und Winterhalbjahr in etwa die Waage halten, sind die Einnahmen pro Gast im Winter deutlich höher. Die Kompensation reduzierten natürlichen Schneefalls durch künstliche Beschneiung ist bereits heute eine verbreitete Maßnahme um mit der jährlich variierenden Schneedecke umzugehen (Band 3, Kapitel 4).

Zukünftige Anpassungsmöglichkeiten durch technische Beschneiung sind begrenzt. Es sind zwar derzeit 67 % der Pistenfläche mit Beschneiungsanlagen ausgerüstet, jedoch ist der Einsatz der Anlagen durch steigende Temperaturen und die Verfügbarkeit von Wasser eingeschränkt (wahrscheinlich, Band 3, Kapitel 4). Die Förderung des Ausbaus der Beschneiung durch die öffentliche Hand könnte daher zu Fehlanpas-

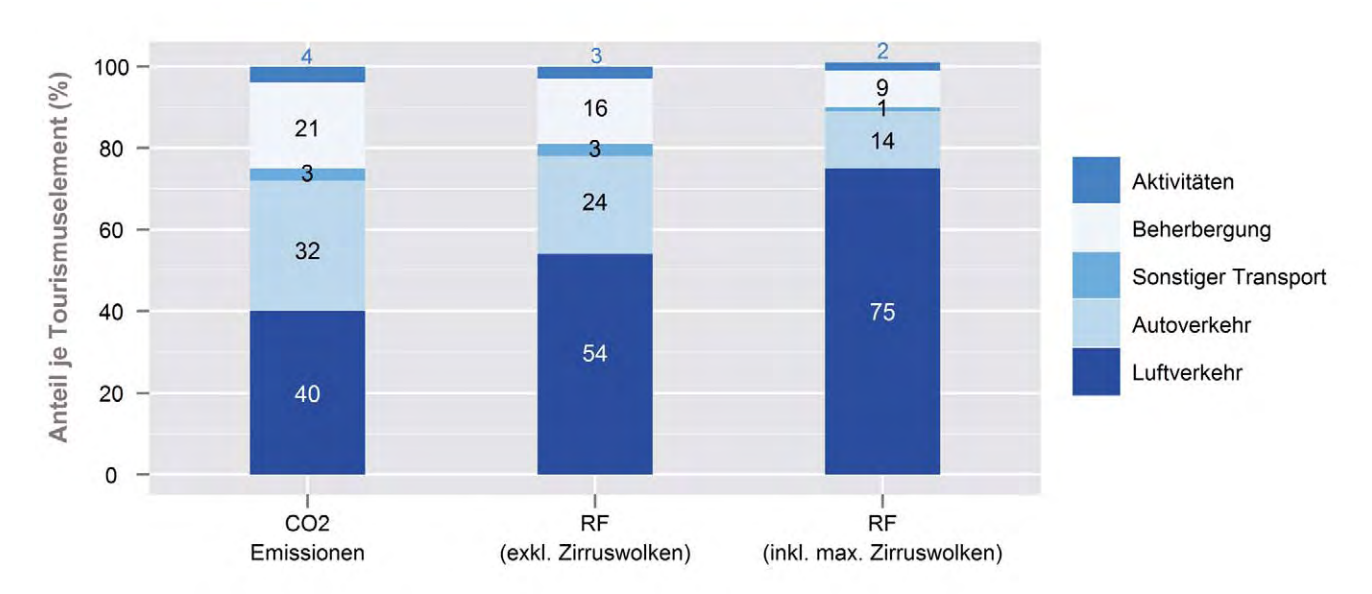


Abbildung S.3.8. Geschätzter Anteil der Tourismusaktivitäten an globalen CO_2-Emissionen und Strahlungsantrieb des Tourismus (inklusive Tagestourismus) im Jahr 2005. Quelle: adaptiert von UNWTO-UNEP-WMO (2008)

Figure S.3.8. Estimated share of tourist activites which contribute to global CO_2 emissions and radiation (inlcuding day-trippers) in 2005. Source: adapted from UNWTO-UNEP-WMO (2008)

sungen und kontraproduktiven „Lock-in Effekten" führen (Band 3, Kapitel 4).

Die Beschneiung führt auch zu erhöhtem Energieverbrauch, dementsprechend höheren Kosten und somit zu erhöhten Preisen für die SkifahrerInnen. Bereits heute ist dies für viele Menschen ein Grund, den Skisport nicht mehr auszuüben. Eine weitere Strategie stellt die Ausweitung bzw. das Ausweichen von Skigebieten in höhere Lagen und Nordhänge zur Sicherung eines durchgehenden Schibetriebs mit frühem Saisonstart und spätem Saisonende dar. Diesbezügliche Tendenzen konnten in der Vergangenheit bereits beobachtet werden. Allerdings sieht sich auch diese Strategie einigen Beschränkungen gegenüber, wie etwa der Präferenz von SkifahrerInnen für sonnige Hänge, der naturräumlichen Begrenztheit vieler Skigebiete, sich weiter in die Höhe auszubreiten, dem potentiell erhöhten Lawinen- und Windrisiko sowie der Gefährdung fragiler Ökosysteme (Band 3, Kapitel 4).

Eine allgemeine und vielfach genannte Strategie zur Anpassung an den Klimawandel – nicht nur im Wintertourismus – stellt die **Diversifizierung des Angebots** dar. Ein gemischtes Angebotsportfolio weist bereits aufgrund des impliziten Versicherungseffektes ein geringeres Gefährdungspotential als ein einseitig ausgerichtetes Angebot auf. Dennoch zeigen Ergebnisse, dass das Potential der Angebotsdiversifizierung begrenzt ist, denn die Skidestinationen werde nicht wegen der schneeunabhängigen Alternativangebote, sondern aufgrund der schneebasierten Aktivitäten aufgesucht (Band 3, Kapitel 4.)

Für besonders stark gefährdete Gebiete steht in letzter Konsequenz auch die Erstellung eines integrativen Ausstiegsszenarios aus dem Schneetourismus als Strategie zur Verfügung. Insbesondere am Alpenrand und in tieferen Lagen ist der Prozess der Schließung nicht mehr rentabler Anlagen kleinerer Betriebe bereits beobachtbar. Das kleine Skigebiet am Gschwender Horn in Immenstadt (Bayern) stellt ein bekanntes und erfolgreiches Beispiel eines aktiv geplanten Rückzugs vom nicht mehr rentablen Skitourismus nach einer Serie von schneearmen Wintern Anfang der 1990er Jahre dar. Die Lifteinrichtungen wurden abgetragen und die Skipisten renaturiert. Heute wird das Gebiet für Sommer- (Wandern, Mountainbiking) und Wintertourismus (Schneeschuhwandern, Schitouren) genutzt (Band 3, Kapitel 4).

Grundsätzlich gibt es eine Reihe von Strategieansätzen, die eine adäquate Anpassung des Tourismussektors an den Klimawandel ermöglichen könnten (Band 3, Kapitel 4). Wie erfolgreich diese Ansätze umgesetzt werden, hängt jedoch auch davon ab, ob eher individuell und reaktiv oder vernetzend und vorausschauend gehandelt wird. Nur vernetzende und vorausschauende Aktivitäten würden kontraproduktive Situationen (wie etwa höherer Ressourcenverbrauch durch Beschneiungsanlagen) vermeiden und eine langfristig erfolgreiche Entwicklung des österreichischen Tourismussektors ermöglichen (Band 3, Kapitel 4).

Einbußen im Tourismus im ländlichen Raum haben hohe regionalwirtschaftliche Folgekosten. Da der Verlust an

Arbeitsplätzen hier oft nicht durch andere Branchen aufgefangen werden könnte, würde ein diesbezüglicher Strukturwandel zu Abwanderungen führen. Bereits jetzt stehen periphere ländliche Räume durch Urbanisierungswellen vor großen Herausforderungen (Band 3, Kapitel 4).

Durch zukünftig zu erwartende sehr hohe Temperaturen im Mittelmeerraum im Sommer könnte der Tourismus in Österreich profitieren. Indirekt könnte der Sommertourismus davon profitieren, dass aufgrund der erwartenden hohen Temperaturen im Mittelmeerraum das österreichische Klima im Vergleich dazu attraktiver wird (Band 3, Kapitel 4).

S.3.7 Produktion
S.3.7 Production

Der Energieeinsatz in der österreichischen Industrie war zwischen 1970 und 1995 mit 200 bis 250 PJ / Jahr relativ konstant, wuchs aber danach deutlich und überstieg 2005 die 300 PJ Marke (Abb. S 3.9, Band 3, Kapitel 5).
Im Zeitraum 1970 bis 1995, in dem kaum ein Zuwachs des Energieverbrauches erfolgte, stieg der Produktionswert und die Produktionsmengen um knapp mehr als das Doppelte. Dies ist darauf zurück zu führen, dass einerseits Produktionssteigerungen durch Effizienzerhöhungen im Rahmen der allgemeinen technischen Entwicklung kompensiert wurden und andererseits darauf, dass es eine Strukturänderung im Bereich der Produktion gegeben hat. In den Jahren 1973 und 1980 erfolgten Einbrüche, die auf die damals aufgetretenen Energie(preis)krisen zurück zu führen sind. Der Anteil der elektrischen Energie ist in den letzten 30 Jahren nahezu konstant (strichlierte Linie in Abbildung S.3.9) um 30 %. In den letzten 1 ½ Jahrzehnten liegt ein völlig anderer Trend vor, der zu einer Steigerung des Energieeinsatzes um beinahe 50 % auf über 300 PJ / Jahr führte (Band 3, Kapitel 5).

Aufgrund des hohen Anteils der Produktion an im Inland emittierten THG stehen für die Produktion bisher hauptsächlich Klimaschutzmaßnahmen (und nicht Anpassungsstrategien) **im Vordergrund.** Emissionsminderungen an klimawirksamen Gasen aus dem Energieeinsatz können im Bereich Produktion einerseits durch Reduktion des Endenergieverbrauchs erfolgen, andererseits durch eine Umstellung auf emissionsärmere Energieträger. Prozessbedingte CO_2-Emissionen sind nur durch Produktions- oder Produktinnovationen verminderbar. Die Reduktion anderer THGe (Methan, Stickoxide, Florkohlenwasserstoffe etc.) kann ebenfalls nur prozessspezifisch erfolgen (Band 3, Kapitel 5).

Obwohl in der österreichischen Industrie bereits Klimaschutzmaßnahmen getroffen werden, gibt es nach wie vor

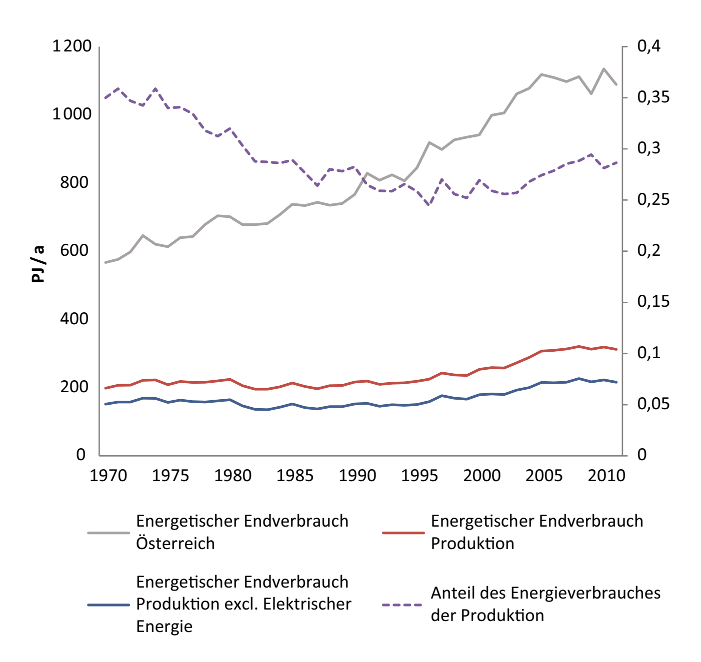


Abbildung S.3.9. Bedeutung des Sektors „Produktion" beim Energieverbrauch in Österreich, Werte in PJ / Jahr. Quelle: Statistik Austria (2012)

Figure S.3.9. Energy consumption of the production sector in Austria; values in PJ / yr. Source: Statistik Austria (2012)

enorme ungenutzte Emissionseinsparungspotentiale. Diese betreffen vor allem Energieeffizienzmaßnahmen und die Nutzung erneuerbarer Energien. Aber auch die Förderung und Entwicklung von radikal neuen Technologie-Innovationen ist für eine mit dem 2 °C-Ziel vereinbare Emissionsreduktion erforderlich (Band 3, Kapitel 5).

Die Industrie ist größter THG-Emittent in Österreich. Im Jahre 2010 betrug der Anteil des produzierenden Bereiches am gesamten österreichischen Energieendverbrauch sowie an den THG-Emissionen jeweils knapp 30 %. Emissionsreduktionen in einem Ausmaß von etwa 50 % und mehr können nicht durch kontinuierliche Verbesserungen und Anwendung des jeweiligen Standes der Technik erreicht werden. Hier ist entweder die Anwendung von Verfahren mit Speicherung der THG-Emissionen (Carbon Capture and Storage, wie etwa in den EU-Szenarien zum Energiefahrplan 2050 hinterlegt) oder die Entwicklung klimaschonender neuer Verfahren notwendig (radikal neue Technologien und Produkte bei drastischer Reduktion des Endenergieeinsatzes). Diese eröffnet Chancen für die Entwicklung neuer Werkstoffe auf internationalen Märkten (Band 3, Kapitel 5).

Nur wenige Teilsektoren haben den größten Anteil am Energiebedarf und damit an den THG-Emissionen. Die fünf größten Emittenten (Energie- und Prozessemissionen) sind die Sektoren Eisen und Stahl, Metallerzeugung, Mine-

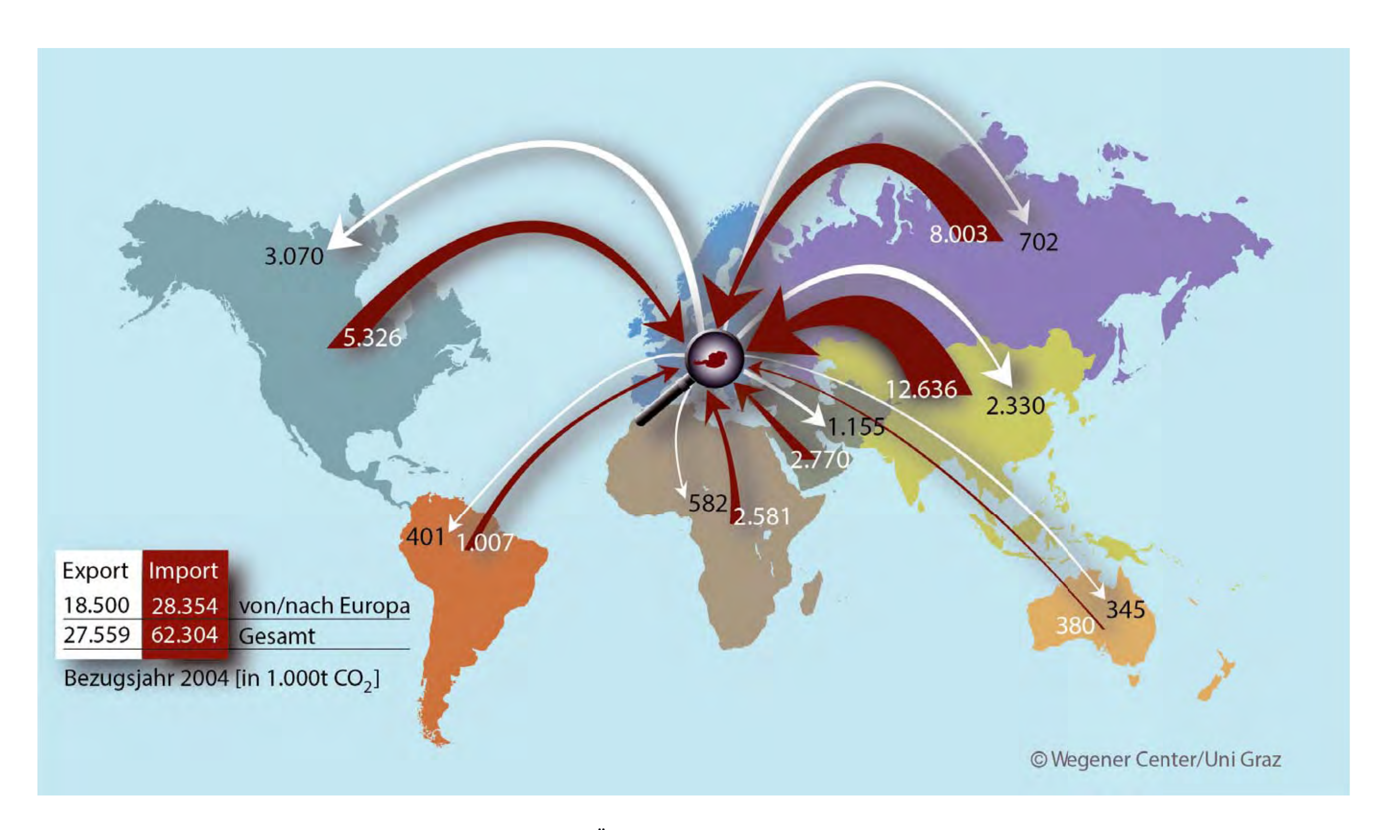


Abbildung S.3.10. CO_2-Ströme im Güterhandel von / nach Österreich, nach Weltregionen. Die in den Importgütern implizit enthaltenen Emissionen sind mit roten Pfeilen dargestellt, die in den Exportgütern enthaltenen, Österreich zugerechneten Emissionen mit weißen Pfeilen. In der Bilanz fallen Süd- / Ostasien, besonders China und Russland als Regionen auf, aus denen Österreich emissionsintensive Konsum- und Investitionsgüter importiert. Quelle: Munoz und Steininger (2010)

Figure S.3.10. CO_2 streams from the trade of goods to/from Austria according to major world regions. The emissions implicitly contained in the imported goods are shown with red arrows, the emissions contained in the exported goods, attributed to Austria, are shown with white arrows. Overall, south Asia and east Asia, particularly China, and Russia, are evident as regions from which Austria imports emission-intensive consumer- and capital- goods. Source: Munoz and Steininger (2010)

ralische Produkte, Zellstoff / Papier / Druck, und Chemie. Gemeinsam sind diese Teilsektoren für mehr als zwei Drittel der Gesamtemissionen in der Produktion verantwortlich.

Bei den bereits getroffenen emissionsreduzierenden Maßnahmen ist aufgrund der Kostenvorteile vor allem die Umstellung von Kohle und Öl auf Gas eine sehr effiziente, bereits umgesetzte Einsparungsstrategie. Ein daraus resultierender Nachteil ist jedoch die Ressourcenabhängigkeit von Ländern mit unsicheren und ethisch fragwürdigen politischen Situationen. Es gibt eine Reihe von weiteren freiwilligen, bereits getroffenen, Maßnahmen wobei viele davon auf die Reduktion des Brennstoffbedarfs abzielen. Diesbezüglich wird ein geringerer Brennstoffbedarf jedoch oft mit einem höheren Strombedarf kompensiert, was zwar die Emissionsbilanz des Sektors verbessert, sich jedoch negativ auf die Emissionsbilanz des Elektrizitätssektors auswirkt. Eine weitere Maßnahme ist das „EU-Emission Trading System“, dem die größten Betriebe der energieintensiven Sektoren unterliegen. Aufgrund der recht durchgängig geringen Zertifikatspreise sind die Emissionsminderungssignale daraus bisher eher gering (Band 3, Kapitel 5).

In Österreich sind Bemühungen zur Verbesserung der Energieeffizienz und zur Förderung erneuerbarer Energieträger zu erkennen, zur Zielerreichung sind sie jedoch nicht genügend mit Maßnahmen hinterlegt. Sowohl hinsichtlich Energieeffizienz als auch hinsichtlich des Einsatzes erneuerbarer Energieträger sind vorhandene Potentiale noch nicht ausgeschöpft. Mit Ausnahme der Zellstoffindustrie sind erneuerbare Energieträger in der Industrie gering verbreitet. Standortbedingt könnten kleinmaßstäbige Wasserkraftwerke eine Alternative zur Stromgewinnung bieten. Neben dem Einsatz von erneuerbaren Energieträgern sind besonders industrielle Kraft-Wärme Kopplungen zu erwähnen. Vor allem in der Papier- und Zellstoffindustrie gibt es diesbezüglich sehr gute Voraussetzungen. Auch in der Herstellung von elektrischem Strom aus Niedertemperaturabwärme (ORC-Anlagen) liegt ein großes Potenzial. Mittelfristig kann auch ein Teil des technologisch erforderlichen Kohlenstoffes

aus biogenen Quellen abgedeckt werden. Auch hier besteht ein großer Forschungsbedarf (Band 3, Kapitel 5; Band 3, Kapitel 6).

Bezieht man auch die durch österreichischen Konsum im Ausland verursachten CO_2-Emissionen mit ein, so liegen die Emissionswerte für Österreich um etwa die Hälfte höher. Ein weiterer wesentlicher Bestandteil einer effektiven Klimaschutzstrategie in der Industrie sollte die Berücksichtigung globaler Prozesse sein. Österreich ist Mitverursacher der Emissionen anderer Staaten. Bezieht man diese Emissionen mit ein und bereinigt sie andererseits um die den österreichischen Exporten zurechenbaren Emissionen, so erhält man die „Konsum-basierten" Emissionen Österreichs. Diese liegen deutlich über den in der UNO-Statistik für Österreich ausgewiesenen Emissionen und dies mit steigender Tendenz (1997 um 38 %, 2004 um 44 % darüber). Aus den Warenströmen lässt sich ableiten, dass die österreichischen Importe die meisten Emissionen in China, Süd- und Ostasien allgemein, bzw. Russland verursachen (Abbildung S.1.5). Die Berücksichtigung des globalen Kontexts würde auch die teilweise hohen Rückgänge im industriellem Energieverbrauch und den Emissionen anderer EU-Mitgliedsstaaten relativieren, da diese oft auch auf Abwanderungen energieintensiver Industriezweige beruhen (Band 3, Kapitel 5; Band 3, Kapitel 6).

Derzeit gibt es bei keiner der untersuchten Branchen Strategien zur Anpassung an den Klimawandel. Es ist anzunehmen, dass Veränderungen des Kühlungs- und Wärmebedarfes, der Verfügbarkeit von Bioressourcen (z. B. Holz) sowie klimabedingt veränderte Nachfrage mögliche Herausforderungen sind.

S.3.8 Gebäude
S.3.8 Buildings

Basis für alle österreichischen Studien im Gebäudebereich bildet die Vollerhebung der Statistik Austria über die Anzahl an Gebäuden und Wohnungen sowie der Mikrozensus, welcher ein gleitendes statistisch relevantes Sample an Wohnungen umfasst. Für Nichtwohngebäude gibt es eine erste Studie zur Ermittlung der Energieverbräuche in verschiedenen Gewerbesparten.

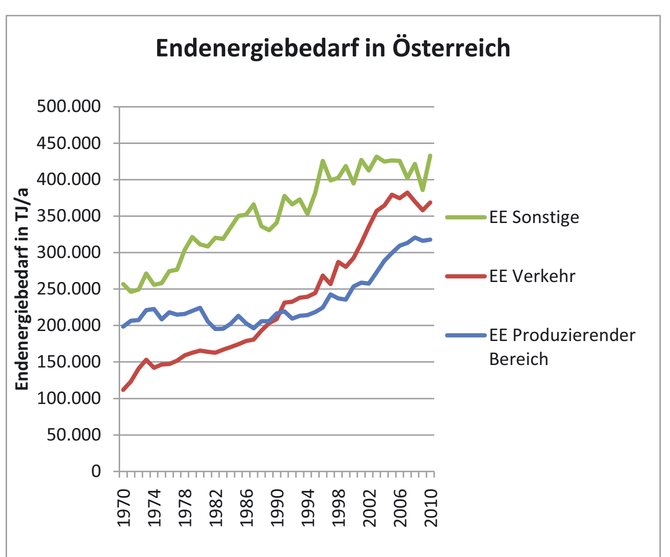
Der Gebäude- und Wohnungsbestand in Österreich wächst seit 1961 linear, zum einen durch die steigende Bevölkerung, zum anderen durch größere Nutzfläche pro Person. Im Jahr 2011 waren ca. 4,4 Mio. Wohnungen in 2,2 Mio. Gebäuden vorhanden, etwa ¾ davon in Form von Ein- und Zweifamilienhäusern. Ca. 70 % der Wohnfläche wurde vor 1980 mit energetisch schlechtem Standard errichtet. Ein Großteil hiervon ist nach wie vor für eine energetische Sanierung geeignet (Band 3, Kapitel 5).

Der Sektor Raumwärme und sonstiger Kleinverbrauch trägt mit 28 % zum Endenergiebedarf und mit 14 % zu THG-Emissionen bei. Trotz des Zubaus an Wohnfläche und Nichtwohngebäudefläche bleibt der Energiebedarf seit 1996 etwa konstant, zusätzlicher Energiebedarf durch Neubauten und Energieeinsparung durch Abriss und Sanierung halten sich etwa die Waage. Private Haushalte machen mit circa 260 PJ / Jahr etwa 62 %, die privaten und öffentlichen Dienstleister mit 130 PJ etwa 31 % des Endenergiebedarfs aus. Der Rest liegt im Bereich der Landwirtschaft. In privaten Haushalten macht die Raumheizung mit über 2 / 3 (195 PJ / Jahr) den Hauptanteil aus, die Warmwasserbereitung liegt bei circa 13 % (35 PJ / Jahr), Kochen bei knapp 3 % (7 PJ / Jahr). Der Rest (sonstiges, 37 PJ / Jahr) entspricht dem Haushaltsstrombedarf. Für Raumheizung und Warmwasser liegen Holz, Gas und Öl jeweils bei 27 %, Fernwärme bei 14 % und Strom bei 9 %; Solarthermie und Wärmepumpen machen jeweils knapp über 2 % aus.

Während sich von 2003 bis 2010 der Anteil erneuerbarer Energieträger für die privaten Haushalte insgesamt von 22,9 auf 26,9 % und der Anteil der Fernwärme von 6,9 % auf 9,9 % erhöht hat, reduzierte sich der Anteil von Heizöl von 25 auf 19 %. Erdgas blieb mit 20,5 % konstant und der Anteil von Kohle war sehr klein, was klar einen Trend hin zu erneuerbaren Energieträgern und Fernwärme darlegt. Dazu tragen die hohe Volatilität der Ölpreise und die Verfügbarkeit von technisch hochentwickelten, automatischen Heizungssystemen auf Basis von Erneuernbaren wesentlich bei.

Im öffentlichen und privaten Dienstleistungssektor wurden hauptsächlich Strom (38 %), Fernwärme (23 %), Erdgas (20 %) und Heizöl (13 %) als Energiequellen herangezogen (Gesamtenergiebedarf 121 PJ), während Biomasse nur 2,5 % ausmacht (keine Angaben zu weiteren Erneuerbaren). Die leitungsgebundenen Energieträger stellen insgesamt über 80 % des energetischen Endverbrauchs im Dienstleistungssektor dar; Kohle, Diesel, Benzin und Flüssiggas sowie die Erneuerbare und Abfälle spielen mit einem Anteil von 4,2 % hingegen gesamtsektoral betrachtet eine geringere Rolle.

Österreichische Haushalte verursachten 2010 ca. 24 Mio. t THG-Emissionen inklusive Biomasse (entspricht 26 %). Werden die CO_2-Emissionen aus biogenen Energieträgern gemäß internationaler Konvention CO_2-neutral bilanziert, reduzieren sich die Emissionen auf 17 Mio. t und der Anteil auf ca. 24 %. Je die Hälfte trägt hierbei Raumwärme sowie sonstiger Kleinverbrauch, Warmwasserbereitung und Strombedarf bei.



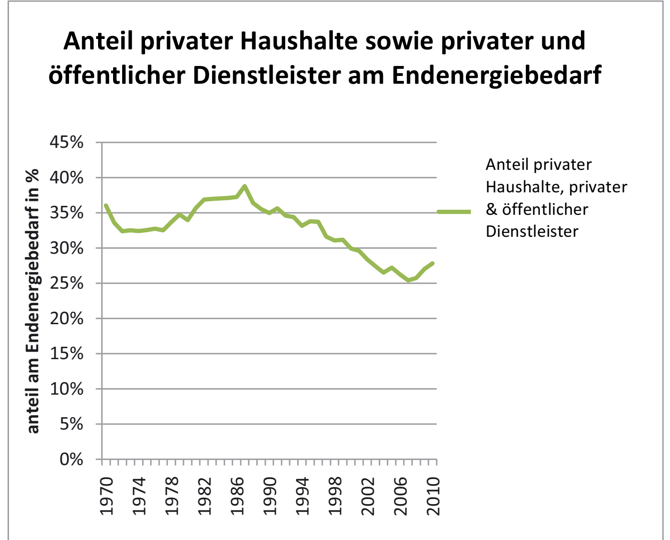


Abbildung S.3.11. Energetischer Endverbrauch der Sektoren (links) und Anteil der Privaten Haushalte sowie Privater und Öffentlichen Dienstleister (rechts). Quelle: Statistik Austria (2012)

Figure S.3.11. Energy end use according to sector (left) and proportion of households, and private & public sector providers (right). Source: Statistik Austria (2012)

Der Sektor „Raumwärme und sonstiger Kleinverbrauch" des Bereichs Haushalte (ohne Strom- und Fernwärmebedarf) trug nach dem Klimaschutzbericht 2011 rund 14 % der THG-Emissionen bei. Verglichen mit dem Anteil von 28 % am Endenergiebedarf, vor allem aufgrund der verwendeten CO_2-emissionsarmen Energieträger (Biomasse und Fernwärme) ist dieser Prozentsatz wesentlich geringer.

Der durch den Klimawandel verursachte Außentemperaturanstieg wird den Heizenergiebedarf von Gebäuden verringern, allerdings wird sich der Kühlbedarf erhöhen. Anpassungsstrategien im Gebäudebereich setzen gesetzliche und förderungstechnische Instrumente zur Reduktion des Kühlbedarfs von Gebäuden sowie technische Maßnahmen in puncto Gebäudeausrichtung, Fensterflächen, Speichermassen, Nachtlüftung etc. voraus.

Basierend auf dem IPCC-Szenario IS92a und den Berechnungsalgorithmen nach der österreichischen normativen Umsetzung der EU *Energy Performance of Buildings Directive* (EPBD) wird die Reduktion des Heizwärmebedarfs 1990 bis 2050 ca. 20 % betragen, bei gleichzeitiger Zunahme des Kühlbedarfs. Der Heizwärmebedarf wird trotzdem für die meisten Gebäude den Kühlbedarf übersteigen.

Technologischer Fortschritt realisiert bei kürzlich errichteten Neubauten und Sanierungen eine deutliche Reduktion des Heizenergiebedarfs, der von 2006 bis 2010 von 42 kWh/m²/Jahr auf 28,8 kWh/m²/Jahr im geförderten Wohnbau sank. Im Sinne des mit der europäischen Gebäuderichtlinie (Neufassung 2010) eingeschlagenen Weges in Richtung „nearly zero energy buildings" ist eine ambitionierte Festlegung von Neubaustandards erforderlich, um hier langfristige Klimaschutzziele zu erreichen. Der Heizwärmebedarf nach thermisch-energetischer Sanierung von Wohnbauten erreichte 2011 einen durchschnittlichen Wert von 48,8 kWh/m²/Jahr. 2006 lag der Wert bei rund 67 kWh/m²/Jahr. Da der größte Anteil an Wohnungen im Bestand liegt, kommt der energetischen Sanierung von Gebäuden der höchste Stellenwert zu.

Die weitere Senkung der THG-Emissionen gelingt durch optimale Einbindung der Nutzung Erneuerbarer im Gebäudebereich. Die Potentialanalyse setzt jedoch die Betrachtung des Gesamtenergiesystems mit Mobilität, Gewerbe, Industrie und Gebäuden voraus, damit eine isolierte Betrachtung des Gebäudesektors nicht zu hohe Potentiale für diesen Bereich ergibt.

Je geringer der Energiebedarf von Gebäuden, desto leichter fällt die Versorgung über Erneuerbare. Solarthermie und Photovoltaik können zunehmend auf den nicht zur Belichtung notwendigen und entsprechend richtig ausgerichteten Flächen zur Energiegewinnung genutzt werden, ebenso wird der Einsatz von mit Erneuerbaren betriebenen Wärmepumpen aufgrund der Skalierbarkeit bis zu sehr kleinen Bau- und Leistungsgrößen weiter forciert werden. Aufgrund limitierter Verfügbarkeit kann Biomasse eher im Bereich Industrie und Mobilität als bei Gebäuden ausgebaut werden, sieht man von Eigenversorgung am Land ab. Nahwärmenetze spielen mit zunehmender Effizienz der Gebäude eine geringere Rolle,

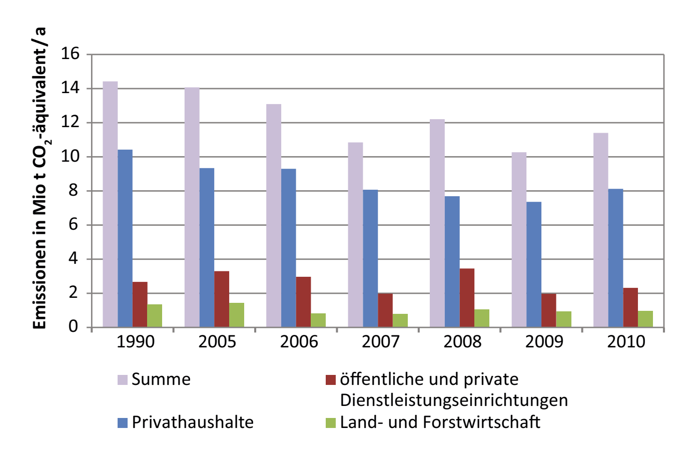


Abbildung S.3.12. CO_2-Äq. Emissionen des Sektors Raumwärme und sonstiger Kleinverbrauch. Quellen: Anderl et al. (2009, 2011, 2012)

Figure S.3.12. CO_2-equivalent emissions in the space heating sector and other small consumers. Sources: Anderl et al. (2009, 2011, 2012)

da das Verhältnis Wärmeabgabe zu Netzverluste immer ungünstiger wird.

Der Haushaltsstromverbrauch wird ohne gravierende politische Eingriffe weiter ansteigen. Zwar bieten effizientere Technologien Einsparungspotential, durch Verbreitung neuer stromintensiver Anwendungsbereiche, bei gleichbleibenden niedrigen Strompreisniveaus wird der Gesamtstromverbrauch jedoch zumindest moderat weitersteigen.

Bis 2050 kann mittels höherer Energieeffizienz und erneuerbaren Energien eine Abdeckung von etwa 90 % des Wärmebedarfs im Gebäudebereich erzielt werden. Die – jedoch weitgehend noch nicht mit Maßnahmen hinterlegte – Energiestrategie Österreich sieht einen Investitionseinsatz von 2,6 Mrd. € / Jahr zur Erreichung einer 3 %-igen Sanierungsrate für Wohngebäude bis 2020 vor. Der ausgelöste Bruttoproduktionswert beträgt rund 4 Mrd. € / Jahr, der Fördermitteleinsatz wird mit ca. 1 Mrd. € / Jahr angegeben. Für Nichtwohngebäude würden bei einer Sanierungsrate von 3 % circa 400 Mio. € / Jahr dazukommen. So könnten bis 2020 ca. 4,1 Mio. t / Jahr THG-Emissionen und ca. 1,33 Mrd. € / Jahr Energiekosten eingespart und etwa 37 000 neue Arbeitsplätze geschaffen werden, was bei einer Laufzeit von 10 Jahren ca. 14 Mrd. € an Fördermitteleinsatz und ca. 3 400 t / Jahr dauerhafte Emissionseinsparung darstellt (Band 3, Kapitel 5).

Handlungsoptionen zur weiteren Verbesserung der energetischen Gebäudesanierung gibt es in der verstärkt energetischen und ökologischen Ausrichtung der Bauordnungen für Neubauten und Sanierung sowie in der Verschiebung von Wohnbaufördermitteln in Richtung Sanierung. Auch die Datenlage zu Gebäudebestand und Energieverbrauch (besonders Nichtwohngebäude) ist in Österreich verbesserungswürdig. Im Stadtklimabereich (Städtebau, Farbgebung, Gebäudebegrünung) liegen erst wenige Untersuchungen mit Österreichbezug vor, sodass die Abschätzung von Temperaturreduktionmaßnahmen zur Minderung der klimabedingten Erwärmung in Ballungsräumen und dadurch erzielbarer Energie- und Emissionseinsparungen noch nicht umfassend möglich ist. Detailliertere ökonomische Studien zur Kosten / Nutzen-Abschätzung hochwertiger Gebäudesanierung fehlen ebenfalls weitgehend, die meisten Studien widmen sich lediglich Einzelobjekten (Band 3, Kapitel 5).

S.3.9 Transformationspfade
S.3.9 Transformative Pathways

Ohne Maßnahmen zur Eindämmung der Emissionen ist mit bedeutenden negativen Konsequenzen für die Biospäre sowie für die sozio-ökonomischen Bedingungen weltweit zu rechnen. Ein wichtiger Zielwert, um den im Sinner der UNFCCC „gefährlichen" Klimawandel einzugrenzen, ist die Zunahme der Erderwärmung auf maximal 2 °C zu begrenzen. Zusätzlich zu den notwendigen Minderungs- sind jedenfalls Anpassungsmaßnahmen erforderlich, um den Auswirkungen des nicht mehr zu verhindernden Klimawandels zu begegnen (Band 3, Kapitel 1; Band 3, Kapitel 6).

Der bis zum Ende des 21. Jahrhunderts und darüber hinaus realisierte Temperaturanstieg hängt maßgeblich von den bis dahin kumulierten CO_2-Emissionen ab. Abbildung S.3.13 illustriert diesen Zusammenhang anhand von Ergebnissen zahlreicher Modelle für jeden der vier vom IPCC (2013) entwickelten „Repräsentativen Konzentrationspfade" (RCP) bis 2100.

Die bisherigen Klimaschutzmaßnahmen haben sich als unzureichend erwiesen, um die gefährlichen Klimawandeltrends umzukehren. Jede weitere Verzögerung weltweiter Schutzmaßnahmen gefährdet zunehmend die Erreichbarkeit des 2 °C Zieles. Die überwiegende Wirkungsrichtung der bisher vorgeschlagenen Maßnahmen war „top-down" und auf Nationalstaaten bezogen. Teilweise sind sie in internationalen Verträgen verbrieft. Eine wesentliche Ursache für die Ineffektivität gegenwärtiger Klimapolitik liegt darin begründet, dass sie nicht anerkennt, welch große Zahl von Akteuren an der Klimaverantwortung teilhat und dass daher ein interaktiver (bottom-up und top-down) und rückgekoppelter Politikprozess zu effektiver Regulierung notwendig wäre. Ein weiterer bedeutender Faktor für das Politikversagen ist in der komplexen Verbindung von sozialer, wirtschafts- und Umweltproblematik begründet. Die wiederholte Enttäuschung hochgesteckter

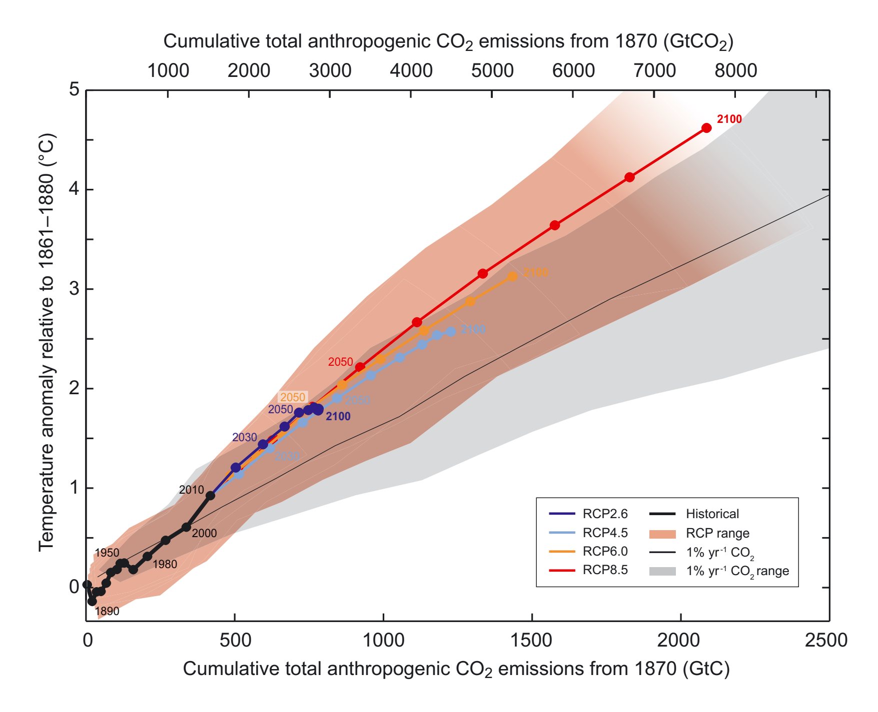


Abbildung S.3.13. Die Wirkung kumulativer Emissionen auf den Temperaturanstieg, historisch von 1870 bis 2010 sowie zukünftig in den vier „repräsentativen Konzentrationspfade" (RCP). Jeder RCP ist als farbige Linie und mit Punkten für die Durchschnitte pro Jahrzehnt dargestellt. Empirisch belegte Ergebnisse über die historische Periode (1860 bis 2010) werden fettgedruckt in schwarz angezeigt. Die dünne schwarze Linie zeigt Modellergebnisse mit 1 % jährlicher CO_2-Steigerung. Der rosafarbene Bereich zeigt die Spannweite der Ergebnisse des gesamten Szenario-Ensembles für die vier RCPs (siehe Band 1, Kapitel 1; Band 3, Kapitel 1). Diese sind jeweils nach ihrem im Jahr 2100 erreichten Strahlungsantrieb (zwischen 2,6 und 8,5 W/m²) benannt. Quelle: IPCC AR5 WG1 SPM (2013)

Figure S.3.13. The impact of cumulative total CO_2 emissions on temperature increases for the historic period from 1870 to 2010 and for the future using four "Representative Concentration Pathways" (RCPs). Each RCP is depicted as a coloured line, with points indicating mean decadal values. Results from empirical studies for the historical period (1860 to 2010) are indicated in black. The thin black line depicts model results with a CO_2 increase of 1 % per year. The pink coloured plume illustrates the spread of the suite of ensemble models for the four RCP scenarios (see Volume 1, Chapter 1 and Volume 3, Chapter 1). These are named after their radiation forcing reached in 2100 (between 2.6 and 8.5 W/m²); Source: IPCC AR5 WG1 SPM (2013)

Erwartungen bezüglich der internationalen Klimaverhandlungen hat zu Klimapolitikverdrossenheit bei PolitikerInnen und Öffentlichkeit geführt. (Band 3, Kapitel 6)

Um gangbare Pfade zur Erreichung des 2 °C Zieles entwerfen zu können, ist es erforderlich ein Verständnis für die Zusammenhänge zwischen Umweltzerstörung, Armut und sozialer Ungleichheit zu entwickeln. Beispiele für solche Interaktionen sind das Zusammenwirken von Klimawandel, Mobilitätsverhalten und Landnutzungsänderungen, die Bevölkerungsentwicklung, der Gesundheitszustand der Bevölkerung und Umweltschädigungen, technologischem Wandel und globaler Marktintegration sowie der Tatsache, dass einige Teile der Welt sich rasch verändern, während andere in Stagnation und Armut verharren (Band 3, Kapitel 6).

In struktureller Hinsicht stehen die Krise des Klimawandels und der übermäßige Ressourcenverbrauch in engem Zusammenhang mit der derzeit vorherrschenden wirtschaftlichen Ordnung. Aus dieser Perspektive sind die ressourcenintensiven Lebensweise und die Produktionsverhältnisse, sowie das Herrschen von wenigen über viele und die zunehmende wirtschaftliche Ungleichheit allesamt Bestandteil und Grundursache der Klimakrise. **Weil die gegenwärtig vorherrschenden Strukturen und Praktiken für die Nachhaltigkeitskrise ursächlich sind, müssen diese zur Überwindung der Krise verändert werden.** Jene derart umfassenden sozioökonomischen Veränderungsprozesse, die auf Nachhaltigkeit abzielen, werden als **sozio-ökologische Transformation** bezeichnet (Band 3, Kapitel 6). Zu den neuen Pfaden und Praktiken zählen transformative Ansätze der Klimawandelvermeidung und -anpassung, die über marginale und inkrementelle Schritte hinausgehen. Solche Maßnahmen können Änderungen in Form und Struktur erfordern, sie eröffnen damit grundsätzlich neue Handlungsstrategien (Band 3, Kapitel 6).

Ganz in diesem Sinne zeigt die vorangegangene sektorale Betrachtungsweise, dass in Österreich in allen Sektoren bedeutendes Emissionsminderungspotential vorhanden ist und dass Maßnahmen, dieses zu nutzen, bekannt sind. Sie macht aber auch deutlich, dass **weder mit den geplanten, noch mit wei-**

terreichenden sektoralen, meist technologieorientierten Maßnahmen der von Österreich zu erwartende Beitrag zur Einhaltung des globalen 2 °C Zieles erreicht werden kann. Das 2 °C Ziel einzuhalten erfordert auch in Österreich mehr als inkrementell verbesserte Produktionstechnologien, grünere Konsumgüter und eine Politik, die marginale Effizienzsteigerungen anstößt. **Es ist eine Transformation der Interaktion von Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt erforderlich, die von Verhaltensänderungen der Einzelnen getragen wird, solche aber ihrerseits auch befördert**. Wird die Transformation nicht rasch eingeleitet und umgesetzt, steigt die Gefahr unerwünschter, irreversibler Veränderungen (Band 3, Kapitel 6).

Die in der österreichischen Energiestrategie anvisierten Ziele zum Ausbau erneuerbarer Energien und zur Energieeffizienz orientieren sich an den EU Zielen für 2020, die eine EU-weite Reduktion der Emissionen von 20 % gegenüber 1990 anstreben. Ausgehend von verschiedenen globalen Klimaschutzszenarien bestehen ernsthafte Zweifel, ob die von der EU vorgegebenen Reduktionsziele für 2020 ausreichend sind, um das langfristig anvisierte Ziel einer Stabilisierung des Temperaturanstiegs unter 2 °C kosteneffizient zu erreichen (Band 3, Kapitel 1). Stattdessen werden für Industrieländer stringentere Emissionsziele im Bereich von –25 bis –40 % für 2020 diskutiert, was auch mit den illustrativen Reduktionspfaden im EU „Fahrplan für den Übergang zu einer wettbewerbsfähigen CO_2 armen Wirtschaft 2050" nahegelegt wird.

Umgelegt auf Österreich werden die EU-2020-Ziele derzeit als Reduktionsverpflichtung von etwa 3 % gegenüber 1990 interpretiert. Das ist ein bedeutend niedrigeres Klimaschutzziel für 2020 als Österreich ursprünglich für die erste Kyoto-Periode bereits für 2012 anvisierte. Als überdurchschnittlich wohlhabendes Land innerhalb der EU, das außerdem relativ großzügig mit erneuerbaren Energiepotenzialen ausgestattet ist, wäre es für Österreich gut möglich sich in seinen Klimaschutzzielen für 2020 zumindest an den ursprünglichen Kyoto-Zielen (–13 % Emissionen im Vergleich zu 1990) zu orientieren.

Aktuelle Studien zu den Auswirkungen der Konjunkturkrise von 2008 bis 2010 im EU-Raum kommen darüber hinaus zu dem Schluss, dass die Krise dazu beigetragen hat, dass die EU2020 Ziele von –20% THG-Emissionen deutlich günstiger zu erreichen sind als ursprünglich angenommen und dass diese mit zusätzlichem Aufwand realistischerweise auch übererfüllt werden können (Band 3, Kapitel 6).

In einigen Politikbereichen wird die Diskussion über sozio-ökologische Transformation reduziert auf Konzepte wie **„nachhaltiges Wachstum"**, **„qualitatives Wachstum"** oder die aktuelle Variante **„Green Growth".** Dabei handelt es sich um Konzepte welche die Produktionsweise vor allem durch neuere Technologien umweltfreundlicher machen wollen, die Produktions- und Konsumlogik jedoch unverändert lassen. „Green Growth" schlägt im Wesentlichen eine Fortsetzung bestehender Politikmaßnahmen zur Förderung von Wirtschaftswachstum vor, reichert diese jedoch verstärkt mit Umweltmaßnahmen an. Der kürzlich veröffentlichte „European Report on Development" (2013) erkennt zwar Green Growth als Politikoption an, fordert aber gleichzeitig eine wesentlich breitere Palette von Zielvorstellungen und strukturellen Änderungen, die eine inklusive und nachhaltige Entwicklung gleichsam auf der lokalen, nationalen und globalen Ebene ermöglichen.

Moderne Volkswirtschaften und ökonomische Forschung sind strukturell eng mit dem Paradigma des unbegrenzten wirtschaftlichen Wachstums, gemessen am Bruttoinlandsprodukt (BIP), verbunden. Nationale und internationale Klimaschutzpolitik konzentriert sich auf wachstumsabhängige Politikmaßnahmen. **Nur eine kleine Zahl von Studien hinterfragt kritisch die Auswirkungen von stringenten Klimaschutzzielen auf die Entwicklungspfade von Volkswirtschaften sowie die dabei zu erwartenden Rückkopplungen**.

Da Green Growth als primärer Lösungsansatz umstritten ist, stellt sich die Frage wie man zu Klimaschutz bei gleichzeitiger Zielerreichung in sozio-ökologischen Systemen kommen soll. Dazu muss geklärt werden, wie Leistung und Zielerreichung in sozio-ökologischen Systemen gemessen werden sollen. Für planerische und politische Entscheidungen und um sozio-ökologische Systeme in Richtung Nachhaltigkeit steuern zu können, ist es wichtig **geeignete Indikatorsysteme** zur Verfügung zu haben, die **gesellschaftlichen Fortschritt und Wohlergehen messen**. Einige Faktoren, die zur Lebensqualität beitragen, wie etwa Wohnbauaktivität, gesunde Ernährung, Gesundheitsversorgung, Bildung, Sicherheit korrelieren positiv mit dem BIP, dem gängigen Indikator. Andererseits bewirken auch dem Gemeinwohl schadende Faktoren und Aktivitäten, wie etwa Naturkatastrophen, zunehmende Umweltschäden oder soziale Auflösungsprozesse BIP-Steigerungen. Daher wird auf europäischer und internationaler Ebene nach besser geeigneten Indikatoren gesucht.

Klimafreundlichkeit ist eine erforderliche, für sich allein aber unzureichende, Bedingung nachhaltiger Entwicklung. Das Erreichen des 2 °C Ziels erfordert die gleichzeitige Fokussierung auf klimafreundliche Technologien, Verhaltensweisen und institutionellen Wandel. Insbesondere betrifft dies die Bereiche Energiebereitstellung und -nachfrage, industrielle Prozesse und Landwirtschaft. Diesen drei Aktivitätsfeldern kommt besondere Bedeutung zu: In Österreich verursachten

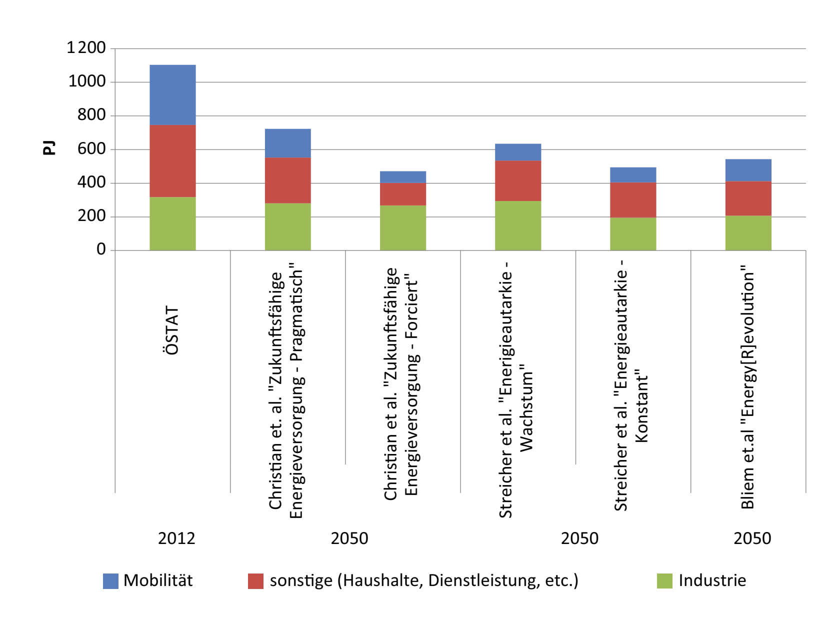


Abbildung S.3.14. Vergleich des Energetischen Endverbrauchs nach Sektoren 2012 und 2050 in verschiedenen Szenarien; Quellen: basierend auf Statistik Austria (2011). Statistik der Zivilluftfahrt (2010)

Figure S.3.14 Comparison of end energy use per sector in 2012 compared to 2050 for various scenarios; Sources: based on Statistik Austria (2011). Statistik der Zivilluftfahrt (2010)

sie im Jahr 2010 79 % der treibhauswirksamen Emissionen, davon der Straßenverkehr alleine rund ein Drittel, industrielle Prozesse verursachten 13 % der Emissionen und die Landwirtschaft 9 %. Das Kriterium Klimafreundlichkeit muss in zukünftigen Investitions-, Produktions-, Politik- und Konsumentscheidungen als Selbstverständlichkeit integriert werden um die Gefahr irreversibler Schäden zu begrenzen. Gleichzeitig ist darauf zu achten, dass weder soziale, noch ökonomische Rahmenbedingungen überfordert werden. Klimafreundlichkeit ist also in den Kontext der wesentlich breiter angelegten Kriterien der Nachhaltigkeit einzubinden.

Während **klimafreundliche Maßnahmen** oft mit Kosten und unerwünschten Veränderungen verbunden sind, haben diese Maßnahmen auch das **Potential unterschiedliche Begleitnutzen zu entfalten**, etwa in den Bereichen Lebensqualität, Gesundheit, Beschäftigung, ländliche Entwicklung und Umweltschutz, Versorgungssicherheit und nicht zuletzt Entlastung der Handelsbilanz. Die Internalisierung dieser positiven Begleiteffekte von Klimaschutz schafft den nötigen Handlungsspielraum.

Für Österreich liegen mehrere empirische Untersuchungen vor, die Veränderungen im Energiesystem bis 2050 analysieren. Allesamt sehen sie Möglichkeiten zur Reduktion des energetischen Endverbrauchs um etwa 50 % bis 2050 (siehe Abbildung S.3.14).

Die Energiemodelle, mit denen die in Abbildung S.3.14 vorgestellten Szenario-Analysen durchgeführt wurden, zeigen, dass sie den Optionen zur Änderung der Energiebereitstellung viel Aufmerksamkeit widmen, **während eine wesentliche Herausforderung weitgehend unbeachtet bleibt, nämlich die Analyse der Nachfrage und des Energieverbrauchs.** Diese zu untersuchen würde es erfordern eine ungleich größere Anzahl technischer Details, AkteurInnen und institutioneller Arrangements zu berücksichtigen sowie die Ursachen („driving forces") der steigenden Energienachfrage zu analysieren. Solche Untersuchungen wären aber nötig, um die wesentlichen AkteurInnen, Maßnahmen, Barrieren, Risiken und Kosten der Transformation zu beschreiben. Weil mit dem Umbau zur Klimaverträglichkeit keineswegs nur Belastungen verbunden sind, sondern dabei auch bedeutende Wachstumsbranchen gegründet werden, besteht öffentliches und volkswirtschaftliches Interesse daran, die neu entstehenden Möglichkeiten und die zu erwartenden Umverteilungsprozesse darzustellen. Dies ist auch erforderlich um effektiv wirkende Märkte gestalten zu können und nicht zuletzt um Handlungsspielräume zur internationalen Verhandlung des globalen 2 °C Ziels zu identifizieren.

Um innerhalb der oben skizzierten Energieszenarien alternative Pfade zur Transformation in eine klimafreundliche und nachhaltige Gesellschaft zu erörtern, ist es außerdem erforderlich die **Auswirkung von globalen und regionalen Entwicklungsdynamiken** zu berücksichtigen, die den weiteren Kontext für Entwicklungsoptionen in Österreich bilden und die in den Modellen nur unvollständig berücksichtigt werden. Bevor Handlungsmöglichkeiten einzelner AkteuInnen angesprochen werden, ist es im Sinne eines holistischen Ansatzes auch nötig die Implikation der jeweils gewählten Bilanzrahmen der Klimaverantwortung zu spezifizieren, weil diese maßgeblich definieren was als Handlungsspielraum und -wirkung der Klimaschutzmaßnahmen sichtbar wird.

Der Klimawandel wird in anderen Weltregionen teilweise zu größeren Auswirkungen führen, und den Migrationsdruck

auf Europa (und damit Österreich) erhöhen. Wiewohl Migration bisher primär innerhalb der jeweiligen Region stattfindet, könnten insbesondere die schon jetzt einsetzenden Flüchtlingsströme aus Afrika nach Europa weiter anwachsen. Veränderungen der Migrationsströme können sowohl Folge von extremen Wetterereignissen als auch von längerfristiger Klimavariabilität sein und können für viele eine effektive Anpassungsstrategie an den Klimawandel darstellen.

Als kleine, diversifizierte und wirtschaftlich offene Volkswirtschaft ist Österreich einer Vielzahl von internen und externen Dynamiken ausgesetzt, die bisher nur unvollständig als treibende Faktoren in Energie- und Emissionsmodellen abgebildet werden. Ein Beispiel dafür ist die rasch fortschreitende europäische und globale Marktintegration und Globalisierung, die bewirkt, dass Prozessketten der verarbeitenden Industrien internationalisiert und komplexer werden sowie die räumlichen Distanzen zwischen den Orten der Produktion und des Konsums von Gütern weiter zunehmen. Wie weiter oben erwähnt gilt beispielsweise im Fall von Österreich, dass bei der Produktion von Importgütern mehr Emissionen im Ausland anfallen als im Inland zur Produktion von Exporten entstehen (Band 3, Kapitel 6). Klimaschutzmaßnahmen müssen solche Zusammenhänge berücksichtigen, weil zu eng definierte Bilanzrahmen eine weitere Auslagerung von Emissionen anregen können und daher ihre Aufgabe, eine globale Reduktion von THG zu erreichen, verfehlen würden.

Die österreichische Politik hat sich im Rahmen der EU-Klimapolitik zum Handeln verpflichtet. (Band 3, Kapitel 1; Band 3, Kapitel 6) Dazu ist eine **Verstetigung und langfristige Planbarkeit der Klimaziele** anzustreben, welche die österreichische Klimapolitik der jüngeren Vergangenheit nicht aufweist. Langfristig bindende Klimaziele minimieren Investitionsrisiken und ermöglichen es privatwirtschaftlichen AkteurInnen vorausschauende Planungsentscheidungen für langlebige Infrastruktur treffen zu können. Eine grundsätzliche Politikmaßnahme wäre auch die umfassende **Evaluierung von Fördermitteln und Subventionen auf mögliche Klimaeffekte**, da diese eine wichtige Steuerungsmöglichkeit der Politik darstellen. Das betrifft insbesondere z. B. die im EU-Vergleich niedrigen Mineralölsteuern, die Pendlerpauschale, die Wohnbauförderung soweit sie nicht mit Auflagen zur Energieeffizienz verknüpft ist, den steuerbefreiten Flugverkehr und steuerbegünstigte Firmenwagen.

Besondere Bedeutung kommt der Unterstützung **neuer Anreizsysteme** zu, die Handeln direkt beeinflussen, gegebenenfalls neue Geschäftsmodelle entstehen lassen und die Energienachfrage bremsen. Energy Service Companies (ESCOs) sind ein Beispiel eines solchen Geschäftsmodells. Sie verfügen selbst oder in Verbindung mit einem Finanzinstitut über einen Fördertopf, aus dem Kapitalmittel bezogen werden können, um Verbesserungen der Energieeffizienz von Anlagen oder Gebäuden durchführen zu können. Ein Teil der dann eingesparten Energieausgaben wird in Folge dazu verwendet, um dem Fördertopf die Investitionen in effizienzsteigernde Maßnahmen zurückzuzahlen.

Durch eine Bepreisung von CO_2 können Produktions-, Konsum- und Investitionsentscheidungen systematisch in Richtung Klimaverträglichkeit gelenkt und die Dekarbonisierung der Energiesysteme sowie eine klimaverträgliche Entwicklung beschleunigt werden (Band 3, Kapitel 6). Indem KäuferInnen für Güter und Dienstleistungen proportional zu deren Klimawandelauswirkung mehr zahlen müssten, besteht für sie ein Anreiz zu alternativen, mit geringeren Klimawandelauswirkungen zu wechseln – und für die ProduzentInnen ein Anreiz, den Kohlenstofffußabdruck der Güter und Dienstleistungen, die sie produzieren, zu reduzieren. Das ist der Grundgedanke des Emissionshandelssystems der Europäischen Union (EU-ETS; Band 3, Kapitel 1; Band 3, Kapitel 6). Die Schwäche des EU-ETS in seinem gegenwärtigen Design besteht in der fehlenden Anpassungsfähigkeit des Cap und zu großzügiger Allokation der Zertifikate (und damit einer niedrigen Bepreisung, Band 3, Kapitel 6). Daher wären Maßnahmen zur Reform des EU-ETS zielführend, welche daran ansetzen das für transformative Investitionen notwendige Preissignal zu stabilisieren (Band 3, Kapitel 6). In Frage kommen auch hier wieder eine direkte Steuerung der Preise oder eine Steuerung der Mengen, wie von der EU-Kommission vorgeschlagen („Market Stability Reserve"). In einigen Fällen sind auch Emissionssteuern eingeführt worden und haben sich in praktischen Anwendungen durchaus bewährt und als wirkungsvoll erwiesen um Emissionen zu reduzieren (Band 3, Kapitel 6).

Eine wesentliche Rolle werden in der Transformation zur klimaverträglichen Energieinfrastruktur **partizipative Planungsprozesse** spielen. Letztendlich wird es notwendig sein, neue Rollen für Individuen, Netzwerke und Gemeinschaften zu definieren, um Entwicklungspfade zu betreten, die uns in Richtung Nachhaltigkeit bringen. Gemeinschaftliche Energieverbünde haben zwar eine lange Geschichte in Österreich, in der gegenwärtigen Marktstruktur stellen sie aber eher Ausnahmen dar. Diese sind unbedingt erforderlich um neuen und dezentralen Energietechnologien sowie erforderlichen Übertragungsnetzwerken eine Form zu geben, die lokale Akzeptanz gewinnt.

Zentral ist dabei die Rolle von sozialer und technologischer Innovation. Sie erfordert Experimentierfreudigkeit und Erfahrungslernen sowie die Bereitschaft, Risiken einzugehen und den Umstand zu akzeptieren, dass einige Neuerungen

scheitern werden. Dies ist problematisch für einzelne Unternehmen, aber auch im Bereich öffentlicher Politikmaßnahmen, wo Scheitern durchwegs mit negativen Assoziationen verbunden ist. Darüber hinaus besteht durch die Förderung von spezifischen Technologien durch die öffentliche Hand die Möglichkeit, das Regierungen von bestehenden Interessengruppen geleitet werden (Band 3, Kapitel 6).

Erneuerungen von der Wurzel her, auch hinsichtlich der Güter und Dienstleistungen die von der österreichischen Wirtschaft produziert werden und groß angelegte Investitionsprogramme werden notwendig sein. In der Beurteilung von neuen Technologien und gesellschaftlichen Entwicklungen ist darüber hinaus eine Orientierung entlang einer Vielzahl von Kriterien nötig (Multikriterienansatz) und eine integrativ sozio-ökologisch orientierte Entscheidungsfindung anstelle von kurzfristig und eng definierter Kosten-Nutzen Rechnungen. Nationales Vorgehen sollte darüber hinaus international akkordiert werden, sowohl mit den umgebenden EU-Mitgliedsstaaten, als auch mit der weltweiten Staatengemeinschaft und insbesondere in Partnerschaft mit Entwicklungsländern (z. B. durch Zusammenarbeit im Bereich von Technologietransfers, wie der Initiative „Sustainable Energy for All").

In Österreich sind bereits gegenwärtig Änderungen in den Wertvorstellungen vieler Menschen festzustellen, die einer sozial-ökologischen Transformation zuträglich sind. Einzelne PionierInnen des Wandels sind bereits dabei diese Vorstellungen praktisch in klimafreundlichen Handlungs- und Geschäftsmodellen umzusetzen (z. B. Energiedienstleistungsgesellschaften im Immobilienbereich, klimafreundliche Mobilität, Nahversorgung) und Gemeinden oder auch Regionen zu transformieren. Auch auf der politischen Ebene sind Ansätze zur klimafreundlichen Transformation auszumachen. Will Österreich seinen Beitrag zur Erreichung des globalen 2 °C Zieles leisten und auf europäischer Ebene wie auch international eine künftige, klimafreundliche Entwicklung mitgestalten, müssen solche Initiativen intensiviert und durch begleitende Politikmaßnahmen, die eine verlässliche Regulierungslandschaft schaffen, gestützt werden.

Politische Initiativen in Hinblick auf Klimaschutz und Klimawandelanpassung sind – zur Erreichung der zuvor genannten Ziele – auf allen Ebenen in Österreich erforderlich: Bund, Länder, und Gemeinden. Die Kompetenzen sind in der föderalen Struktur Österreichs so verteilt, dass zudem nur ein abgestimmtes Vorgehen bestmögliche Effektivität sowie die Zielerreichung selbst gewährleisten kann. (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage) Für eine effektive Umsetzung der zur Zielerreichung erforderlichen substantiellen Transformation ist zudem die Aktivierung eines breiten Spektrums von Instrumenten angebracht (hohe Übereinstimmung, mittlere Beweislage).

S.4 Bildnachweis
S.4 Figure Credits

Abbildung S.1.1 IPCC, 2001: In: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.

Abbildung S.1.2 Morice, C.P., Kennedy, J.J., Rayner, N.A., Jones, P.D., 2012. Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: The HadCRUT4 data set. J. Geophys. Res. D08101. doi:10.1029/2011JD017187

Abbildung S.1.3

Rogelj J, Meinshausen M, Knutti R, 2012. Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates. Nature Clim. Change 2:248-253.

Abbildung S.1.4 Umweltbundesamt, 2012: Austria's National Inventory Report 2012. Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and under the Kyoto Protocol. Reports, Band 0381, Wien. ISBN: 978-3-99004-184-0

Abbildung S.1.5 Böhm, R., Auer, I., Schöner, W., 2011. Labor über den Wolken: die Geschichte des Sonnblick-Observatoriums. Böhlau Verlag.

Abbildung S.1.6 Für den AAR14 erstellt auf Basis: Kasper, A., Puxbaum, H., 1998. Seasonal variation of SO_2, HNO_3, NH3 and selected aerosol components at Sonnblick (3106 m a. s. l.). Atmospheric Environment 32, 3925–3939. doi:10.1016/S1352-2310(97)00031-9; Sanchez-Ochoa, A. und A. Kasper-Giebl, 2005: Backgroundmessungen Sonnblick. Erfassung von Gasen, Aerosol und nasser Deposition an der Hintergrundmeßstelle Sonnblick. Endbericht zum Auftrag GZ 30.955/2-VI/A/5/02 des Bundesministeriums für Bildung Wissenschaft und Kultur, Technische Universität Wien, Österreich; Effenberger, Ch., A. Kranabetter, A. Kaiser und A. Kasper-Giebl, 2008: Aerosolmessungen am Sonnblick Observatorium – Probenahme und Analyse der PM10 Fraktion. Endbericht zum Auftrag GZ 37.500/0002-VI/4/2006 des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft und Kultur, Technische Universität Wien, Österreich.

Abbildung S.1.7 Für den AAR14 erstellt auf Basis: Steinhilber, F., Beer, J., Fröhlich, C., 2009. Total solar irradiance during the Holocene. Geophysical Research Letters 36. doi:10.1029/2009GL040142; Vinther, B.M., Buchardt, S. L., Clausen, H.B., Dahl-Jensen, D., Johnsen, S. J., Fisher, D.A., Koerner, R.M., Raynaud, D., Lipenkov, V., Andersen, K.K., Blunier, T., Rasmussen, S. O., Steffensen, J.P., Svensson, A.M., 2009. Holocene thinning of the Greenland ice sheet. Nature 461, 385–388. doi:10.1038/nature08355; Renssen, H., Seppä, H., Heiri, O., Roche, D.M., Goosse, H., Fichefet, T., 2009. The spatial and temporal complexity of the Holocene thermal maximum. Nature Geoscience 2, 411–414. doi:10.1038/ngeo513; Hormes, A., Müller, B.U., Schlüchter, C., 2001. The Alps with little ice: evidence for eight Holocene phases of reduced glacier extent in the Central Swiss Alps. The Holocene 11, 255–265. doi:10.1191/095968301675275728; Nicolussi, K.,

Patzelt, G., 2001. Untersuchungen zur holozänen Gletscherentwicklung von Pasterze und Gepatschferner (Ostalpen). Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie 36, 1–87.; Joerin, U.E., Stocker, T.F., Schlüchter, C., 2006. Multicentury glacier fluctuations in the Swiss Alps during the Holocene. The Holocene 16, 697–704. doi:10.1191/0959683606hl964rp; Joerin, U.E., Nicolussi, K., Fischer, A., Stocker, T.F., Schlüchter, C., 2008. Holocene optimum events inferred from subglacial sediments at Tschierva Glacier, Eastern Swiss Alps. Quaternary Science Reviews 27, 337–350. doi:10.1016/j.quascirev.2007.10.016; Drescher-Schneider, R., Kellerer-Pirklbauer, A., 2008. Gletscherschwund einst und heute – Neue Ergebnisse zur holozänen Vegetations- und Gletschergeschichte der Pasterze (Hohe Tauern, Österreich). Abhandlungen der Geologischen Bundesanstalt 62, 45–51.; Nicolussi, K., 2009b. Alpine Dendrochronologie – Untersuchungen zur Kenntnis der holozänen Umwelt- und Klimaentwicklung, in: Schmidt, R., Matulla, C., Psenner, R. (Eds.), Klimawandel in Österreich: Die Letzten 20.000 Jahre – und ein Blick voraus, Alpine Space – Man & Environment. Innsbruck University Press, Innsbruck, pp. 41–54.; Nicolussi, K., 2011. Gletschergeschichte der Pasterze – Spurensuche in die nacheiszeitliche Vergangenheit., in: Lieb, G.K., Slupetzky, H. (Eds.), Die Pasterze. Der Gletscher am Großglockner. Verlag Anton Pustet, pp. 24–27.; Nicolussi, K., Schlüchter, C., 2012. The 8.2 ka event—calendar-dated glacier response in the Alps. Geology 40, 819–822. doi:10.1130/G32406.1; Nicolussi, K., Kaufmann, M., Patzelt, G., Van der Pflicht, J., Thurn- er, A., 2005. Holocene tree-line variability in the Kauner Valley, Central Eastern Alps, indicated by dendrochronological analysis of living trees and subfossil logs. Vegetation History and Archaeobotany 14, 221–234. doi:10.1007/s00334-005-0013-y; Heiri, O., Lotter, A.F., Hausmann, S., Kienast, F., 2003. A chironomid-based Holocene summer air temperature reconstruction from the Swiss Alps. The Holocene 13, 477–484. doi:10.1191/0959683603hl640ft: Ilyashuk, E.A., Koinig, K.A., Heiri, O., Ilyashuk, B.P., Psenner, R., 2011. Holocene temperature variations at a high-altitude site in the Eastern Alps: a chironomid record from Schwarzsee ob Sölden, Austria. Quaternary Science Reviews 30, 176–191. doi:10.1016/j.quascirev.2010.10.008; Fohlmeister, J., Vollweiler, N., Spötl, C., Mangini, A., 2013. COMNISPA II: Update of a mid-European isotope climate record, 11 ka to present. The Holocene 23, 749–754.doi:10.1177/0959683612465446; Magny, M., 2004. Holocene climate variability as reflected by mid- European lake-level fluctuations and its probable impact on prehistoric human settlements. Quaternary International 113, 65–79. doi:10.1016/S1040-6182(03)00080-6; Magny, M., Galop, D., Bellintani, P., Desmet, M., Didier, J., Haas, J.N., Martinelli, N., Pedrotti, A., Scandolari, R., Stock, A., Vannière, B., 2009. Late-Holocene climatic variability south of the Alps as recorded by lake-level fluctuations at Lake Ledro, Trentino, Italy. The Holocene 19, 575–589. doi:10.1177/0959683609104032

Abbildung S.1.8 Böhm, R., 2012. Changes of regional climate variability in central Europe during the past 250 years. The European Physical Journal Plus 127. doi:10.1140/epjp/i2012-12054-6. Basierend auf Daten von: Auer, I., Böhm, R., Jurkovic, A., Lipa, W., Orlik, A., Potzmann, R., Schöner, W., Ungersböck, M., Matulla, C., Briffa, K., Jones, P., Efthymiadis, D., Brunetti, M., Nanni, T., Maugeri, M., Mercalli, L., Mestre, O., Moisselin, J.-M., Begert, M., Müller-Westermeier, G., Kveton, V., Bochnicek, O., Stastny, P., Lapin, M., Szalai, S. , Szentimrey, T., Cegnar, T., Dolinar, M., Gajic-Capka, M., Zaninovic, K., Majstorovic, Z., Nieplova, E., 2007. HISTALP—historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region. International Journal of Climatology 27, 17–46. doi:10.1002/joc.1377, sowie auf Daten von: Climatic Research Unit, University of East Anglia, http://www.cru.uea.ac.uk/

Abbildung S.1.9 Böhm, R., 2012. Changes of regional climate variability in central Europe during the past 250 years. The European Physical Journal Plus 127. doi:10.1140/epjp/i2012-12054-6; Basierend auf Daten von: Auer, I., Böhm, R., Jurkovic, A., Lipa, W., Orlik, A., Potzmann, R., Schöner, W., Ungersböck, M., Matulla, C., Briffa, K., Jones, P., Efthymiadis, D., Brunetti, M., Nanni, T., Maugeri, M., Mercalli, L., Mestre, O., Moisselin, J.-M., Begert, M., Müller-Westermeier, G., Kveton, V., Bochnicek, O., Stastny, P., Lapin, M., Szalai, S., Szentimrey, T., Cegnar, T., Dolinar, M., Gajic-Capka, M., Zaninovic, K., Majstorovic, Z., Nieplova, E., 2007. HISTALP – historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region. International Journal of Climatology 27, 17–46. doi:10.1002/joc.1377

Abbildung S.1.10 Auer, I., Böhm, R., Jurkovic, A., Lipa, W., Orlik, A., Potzmann, R., Schöner, W., Ungersböck, M., Matulla, C., Briffa, K., Jones, P., Efthymiadis, D., Brunetti, M., Nanni, T., Maugeri, M., Mercalli, L., Mestre, O., Moisselin, J.-M., Begert, M., Müller-Westermeier, G., Kveton, V., Bochnicek, O., Stastny, P., Lapin, M., Szalai, S., Szentimrey, T., Cegnar, T., Dolinar, M., Gajic-Capka, M., Zaninovic, K., Majstorovic, Z., Nieplova, E., 2007. HISTALP—historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region. International Journal of Climatology 27, 17–46. doi:10.1002/joc.1377; ENSEMBLES project: Funded by the European Commission's 6th Framework Programme through contract GOCE-CT-2003-505539; reclip:century: Funded by the Austrian Climate Research Program (ACRP), Klima- und Energiefonds der Bundesregierung, Project number A760437

Abbildung S.1.11 Auer, I., Böhm, R., Jurkovic, A., Lipa, W., Orlik, A., Potzmann, R., Schöner, W., Ungersböck, M., Matulla, C., Briffa, K., Jones, P., Efthymiadis, D., Brunetti, M., Nanni, T., Maugeri, M., Mercalli, L., Mestre, O., Moisselin, J.-M., Begert, M., Müller-Westermeier, G., Kveton, V., Bochnicek, O., Stastny, P., Lapin, M., Szalai, S., Szentimrey, T., Cegnar, T., Dolinar, M., Gajic-Capka, M., Zaninovic, K., Majstorovic, Z., Nieplova, E., 2007. HISTALP – historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region. International Journal of Climatology 27, 17–46. doi:10.1002/joc.1377; ENSEMBLES project: Funded by the European Commission's 6th Framework Programme through contract GOCE-CT-2003-505539; reclip:century: Funded by the Austrian Climate Research Program (ACRP), Klima- und Energiefonds der Bundesregierung, Project number A760437

Abbildung S.1.12 Gobiet, A., Kotlarski, S., Beniston, M., Heinrich, G., Rajczak, J., Stoffel, M., n.d. 21st century climate change in the European Alps – A review. Science of The Total Environment. doi:10.1016/j.scitotenv.2013.07.050

Abbildung S.2.1 Abbildung für AAR14 erstellt

Abbildung S.2.2 Coy, M.; Stötter, J., 2013: Die Herausforderungen des Globalen Wandels. In: Borsdorf, A.: Forschen im Gebirge –Investigating the mountains – Investigando las montanas. Christoph Stadel zum 75. Geburtstag. Wien: Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften

Abbildung S.2.3 Dokulil, M.T., 2009: Abschätzung der klimabedingten Temperaturänderungen bis zum Jahr 2050 während der Badesaison. Bericht Österreichische Bundesforste, ÖBf AG. Ver-

fügbar unter: http://www.bundesforste.at/uploads/publikationen/Klimastudie_Seen_2009_Dokulil.pdf

Abbildung S.2.4 Hydrographisches Zentralbüro BMLFUW, Abteilung IV/4 – Wasserhaushalt

Abbildung S.2.5 IPCC, 2007: In: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Working Group II Contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.

Abbildung S.2.6 Abbildung für AAR14 erstellt, auf Basis von Daten aus: Munich Re, NatCatSERVICE 2014

Abbildung S.3.1 IPCC, 2013: In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor,S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.; IPCC, 2000: Special Report on Emissions Scenarios [Nebojsa Nakicenovic and Rob Swart (Eds.)]. Cambridge University Press, UK.; GEA, 2012: Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.

Abbildung S.3.2 Schleicher, Stefan P.,2014. Tracing the decline of EU GHG emissions. Impacts of structural changes of the energy system and economic activity. Policy Brief. Wegener Center for Climate and Global Change, Graz. Basierend auf Daten des statistischen Amtes der Europäischen Union (Eurostat)

Abbildung S.3.3 Abbildung für AAR14 erstellt, auf Basis von Daten aus: GLP, 2005. Global Land Project. Science Plan and Implementation Strategy. IGBP Report No. 53/IHDP Report No. 19. IGBP Secretariat, Stockholm. Verfügbar unter: http://www.globallandproject.org/publications/ science_plan.php; Millennium Ecosystem Assessment, 2005. Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. Island Press, Washington, DC. Verfügbar unter: http://www.unep.org/maweb/en/Synthesis. aspx; Turner, B.L., Lambin, E.F., Reenberg, A., 2007. The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. PNAS 104, 20666–20671. doi:10.1073/pnas. 0704119104.

Abbildung S.3.4 Umweltbundesamt, 2012: Austria's National Inventory Report 2012. Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and under the Kyoto Protocol. Reports, Band 0381, Wien. ISBN: 978-3-99004-184-0

Abbildung S.3.5 Für den AAR14 erstellt von R. Haas auf Basis von Daten der Enegrgy Economics Group und der Statistik Austria, 2013a. Energiebilanzen 1970-2011 [WWW Document]. URL http://www.statistik.gv.at/web_de/statistiken/energie_und_umwelt/energie/energiebilanzen/index.html (accessed 7.14.14).

Abbildung S.3.6 Hausberger,S., Schwingshackl, M., 2011. Update der Emissionsprognose Verkehr Österreich bis 2030 (Studie erstellt im Auftrag des Klima- und Energiefonds No. Inst-03/11/Haus Em 09/10-679). Technische Universität, Graz.

Abbildung S.3.7 Übersetzt für AAR14 auf Basis von ADEME, 2007; US DoT, 2010; Der Boer et al., 2011; NTM, 2012; WBCSD, 2012, In Sims R., R. Schaeffer, F. Creutzig, X. Cruz-Núñez, M. D'Agosto, D. Dimitriu, M.J. Figueroa Meza, L. Fulton, S. Kobayashi, O. Lah, A. McKinnon, P. Newman, M. Ouyang, J.J. Schauer, D. Sperling, and G. Tiwari, 2014: Transport. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

Abbildung S.3.8 UNWTO-UNEP-WMO, 2008: Climate change and tourism – Responding to global challenges. UNWTO: Madrid, Spain. Verfügbar unter: http://www.unep.fr/scp/publications/details. asp?id=WEB/0142/PA

Abbildung S.3.9 Abbildung für AAR14 erstellt, auf Basis von Daten aus STATcube – Statistische Datenbank von Statistik Austria. Verfügbar unter: http://sdb.statistik.at/superwebguest/autoLoad.do?db=deeehh

Abbildung S.3.10 Muñoz, P., Steininger, K.W., 2010. Austria's CO_2 responsibility and the carbon content of its international trade. Ecological Economics 69, 2003–2019. doi:10.1016/j.ecolecon.2010.05.017

Abbildung S.3.11 Abbildung für AAR14 erstellt, auf Basis von Daten aus STATcube – Statistische Datenbank von Statistik Austria. Verfügbar unter: http://sdb.statistik.at/superwebguest/autoLoad.do?db=deeehh

Abbildung S.3.12 Abbildung für AAR14 erstellt, auf Basis von Daten aus: Umweltbundesamt, 2009: Klimaschutzbericht 2009. Reports, Band 0226, Wien. ISBN: 978-3-99004-024-9; Umweltbundesamt, 2011: Klimaschutzbericht 2011. Reports, Band 0334, Wien. ISBN: 978-3-99004-136-9; Umweltbundesamt, 2012: Klimaschutzbericht 2012. Reports, Band 0391, Wien. ISBN: 978-3-99004-194-9

Abbildung S.3.13 IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker,T.F., D.Qin, G.-K. Plattner, M.Tignor, S. K.Allen, J.Boschung, A.Nauels, Y.Xia, V.Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA.

Abbildung S.3.14 Abbildung für AAR14 erstellt, auf Basis von Daten aus: Statistik Austria, 2011: Statistik der Zivilluftfahrt 2010. Wien. ISBN 978-3-902791-15-3. Verfügbar unter: http://www.statistik.at/web_de/dynamic/services/publikationen/14/publdetail?id=14&listid=14&detail=489; Bliem, M., B. Friedl, T. Balabanov and I. Zielinska, 2011: Energie [R]evolution 2050. Der Weg zu einer sauberen Energie-Zukunft in Österreich. Endbericht. Institut für Höhere Studien (IHS), Wien; Christian et al., 2011: Zukunfsfähige Energieversorgung für Österreich (ZEFÖ). Vienna, Umweltmanagement Austria, Institut für industrielle Ökologie und Forum Wissenschaft & Umwelt im Rahmen des Programmes „Energie der Zukunft" des BMVIT. Streicher, W., H. Schnitzer, M. Titz, F. Tatzber, R. Heimrath, I. Wetz, S. Hausberger, R. Haas, G. Kalt, A. Damm, K. Steininger and S. Oblasser, 2011: Energieautarkie für Österreich 2050. funded by the Austrian climate and energy fund (kli:en). Universität Innsbruck – Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften, Arbeitsbereich Energieeffizientes Bauen, Innsbruck

Band 1: Klimawandel in Österreich: Einflussfaktoren und Ausprägungen

Volume 1: Climate Change in Austria: Drivers and Manifestations

Dr. Reinhard Böhm gewidmet



© ZAMG

Als einer der besten Kenner der rezenten Klimaentwicklung Österreichs hat er das Konzept dieses Bandes wesentlich mitgestaltet und wichtige Beiträge zum ersten Entwurf geliefert. Völlig unerwartet wurde er durch den Tod mitten aus der Arbeit gerissen.

Band 1 Kapitel 1: Das globale Klimasystem und Ursachen des Klimawandels

Volume 1 Chapter 1: The Global Climate System and Causes of Climate Change

Koordinierende LeitautorInnen
Leopold Haimberger, Petra Seibert

LeitautorInnen
Regina Hitzenberger, Andrea K. Steiner, Philipp Weihs

Für den Begutachtungsprozess
Matthias Rotach

Inhalt

ZUSAMMENFASSUNG

Das Klimasystem der Erde ist ein dynamisches System, das neben der Atmosphäre auch die Hydro-, Kryo-, Bio- und Lithosphäre umfasst und das durch im Detail nicht vorhersagbare Schwankungen charakterisiert ist. Das Klima ist definiert als die mittleren Verhältnisse über mehrere Jahrzehnte hinweg. Es befindet sich in ständigem Wandel, aufgrund interner Variabilität und durch äußere Antriebe. In den vergangen 100 Jahren wurde eine Erwärmung der bodennahen Atmosphäre um rund 1 °C im globalen Mittel beobachtet. Die Rate dieser Erwärmung ist erdgeschichtlich betrachtet hoch, ihr Ausmaß aber noch nicht einzigartig. Jedoch ist sie ist zu einem wesentlichen Teil auf die von Menschen verursachte Emission von Kohlendioxid (CO_2) und anderen Treibhausgasen wie Methan (CH_4) sowie Landnutzungsänderungen zurückzuführen. Dies konnte durch Vergleich der raumzeitlichen Muster der Erwärmung mit Modellsimulationen mit und ohne anthropogenen Einfluss zweifelsfrei festgestellt werden. Die Einflüsse auf die Strahlungsbilanz der Erde werden im so genannten Strahlungsantrieb quantifiziert. Seit Beginn der Industrialisierung hat dieser um 2,2 W / m^2 zugenommen. Den größten Anteil daran hat die Freisetzung von Kohlendioxid, vor allem aus fossilen Brennstoffen und Landnutzungsänderungen. Derzeit werden etwa 10 Gt C / Jahr emittiert, wovon ca. 5 Gt C / Jahr in der Atmosphäre verbleiben, während der Rest etwa zur Hälfte von Landökosystemen und dem Ozean aufgenommen wird. Im Ozean führt das zu einer Abnahme des pH-Wertes, was zu ökologischen Störungen mit längerfristig kaum abschätzbaren Konsequenzen führt. Der Einfluss der anthropogenen Aerosole wird als kühlend eingeschätzt. Durch die ungefilterte Verbrennung von Kohle und Erdöl und die damit verbundene Aerosolproduktion wurde über lange Zeit der Einfluss des anthropogenen Treibhauseffekts auf die Temperatur der Erde teilweise maskiert.

Die künftige Klimaentwicklung kann für einen vorgegebenen Verlauf des Strahlungsantriebs bzw. seiner Treiber (Emissionen und Landnutzungsänderungen) mit Erdsystemmodellen (Erweiterung der klassischen Klimamodelle, die Atmosphäre und Ozean simulieren, um Modelle für biogeosphärische Prozesse) berechnet werden. Für den aktuellen 5. Sachstandsbericht des IPCC wurden die Ergebnisse solcher Erdsystemmodelle mit zahlreichen Modellen verschiedener Forschungszentren weltweit durchgeführten Berechnungen zusammengefasst. Dabei wurden nicht nur unterschiedliche Modelle, sondern auch unterschiedliche Anfangsbedingungen vor allem für den Ozean eingesetzt, um so zu einem Ensemble von Projektionen zu gelangen, das auch eine Abschätzung der Unsicherheiten erlaubt. Es wurden vier verschiedene „repräsentative Konzentrationspfade“ vorgegeben, die mit sozioökonomischen Entwicklungsszenarien in Verbindung stehen. Nur im niedrigsten Pfad bleibt die globale Erwärmung mit großer Wahrscheinlichkeit innerhalb des politisch angestrebten 2-Grad-Ziels. Dieser Pfad geht von einer raschen und massiven Reduktion der Treibhausgasemissionen aus und nimmt typischerweise auch Maßnahmen wie großtechnische Bindung von CO_2 aus dem Abgas oder gar aus der Atmosphäre an. Der höchste Pfad führt von der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts bis 2100 zu einem Temperaturanstieg von im Mittel ca. 4,5 °C, wobei hier das Maximum der Erwärmung noch lange nicht erreicht ist. Bis ca. 2040 sind die Unterschiede zwischen den verschiedenen Pfaden geringer als die Bandbreite der unterschiedlichen Simulationen. Die Erwärmung ist regional verschieden. Auch die Niederschlagsänderungen sind uneinheitlich: feuchte Regionen und Jahreszeiten werden vermutlich mehr Niederschlag erhalten, trockene weniger. Trockene Regionen könnten sich polwärts ausdehnen. Die Erwärmung der Ozeane und das Abschmelzen von Inlandeis führt zu einem Anstieg des Meeresspiegels, der im Jahr 2100 im Bereich zwischen 0,25 m und 1,0 m erwartet wird. Wegen der Trägheit von Ozean und Eisschilden wird er zudem in jedem Fall noch Jahrhunderte lang weiter ansteigen.

SUMMARY

The Earth's climate system is a dynamical system comprising the atmosphere as well as the hydro-, cryo-, bio-, and lithosphere, and being characterised by variations which are not predictable in detail. Climate is defined as the mean conditions over several decades. It is subject to perpetual change due to internal variability and external drivers. In the past 100 years, a global mean warming of the near-surface atmosphere of about 1 °C has been observed. The rate of this warming is high in geological time scales but not yet unique. However, a substantial contribution of warming is attributed to anthropogenic emissions of carbon dioxide (CO_2) and other greenhouse gases such as methane as well as to land-use changes. This was established beyond doubt by comparing the spatio-temporal patterns of the observed warming with model simulations, with and without anthropogenic influences. The influences on the radiation budget of the Earth are quantified through the so-called radiative forcing. Since the beginning of industrialisation, radiative forcing has increased by 2.2 W / m^2. The largest share stems from the release of carbon dioxide, chiefly from fossil fuel combustion and land-use changes. Presently, about 10 Gt C / year are being emitted, of which about 5 Gt C / year

remain in the atmosphere, whereas about one half of the remainder is absorbed each by terrestrial ecosystems and by the ocean. In the ocean, this leads to a decrease of the pH value, leading to ecological disturbances with yet unknown consequences in the long term. The influence of anthropogenic aerosols is considered to be a cooling one. Burning of coal and oil without flue-gas treatment masked the influence of the anthropogenic greenhouse effect on the Earth's temperature for a long time.

The future development of climate can be calculated for a given temporal evolution of the radiative forcing, or, respectively, its drivers (emissions and land-use changes) with earth system models (an extension of classic climate models simulating the atmosphere and oceans with models of biogeochemical processes). Results of such computations, carried out with different models of various research centres worldwide, were summarised in the recent 5th IPCC report. Beside different models, different initial conditions were applied especially for the ocean in order to provide an ensemble of projections allowing also for an estimate of uncertainties. Four different „representative concentration pathways", related to socio-economic development scenarios, were prescribed. Only for the lowest of these pathways, global warming would remain with high likelihood within the politically defined objective of 2 °C maximum warming. This path supposes a rapid and massive reduction of greenhouse gas emissions; typically it also assumes measures such as large-scale separation of CO_2 from flue gas or even from the atmosphere. The highest pathway leads to a temperature rise of about 4.5 °C (global mean) from the second half of the 19th century to 2100, with the maximum warming still not being reached then. Until about the year 2040, the differences between the various paths are smaller than the bandwidth of the different simulations. The warming differs regionally. Also the precipitation changes are inhomogeneous: moist regions and seasons will probably receive more precipitation, dry ones less. Dry regions may spread polewards. Ocean warming and melting of inland ice leads to sea-level rise expected to range between 0.25 m and 1.0 m in 2100. Moreover, sea level is bound to rise for centuries in any case because of the inertia of oceans and ice shields.

KERNAUSSAGEN

- Der in den letzten etwa 100 Jahren beobachtete, rasche globale Temperaturanstieg ist erdgeschichtlich nicht extrem, jedoch ist er zum ersten Mal durch anthropogene Aktivitäten mit verursacht. Der Vergleich von beobachteten und mit Klimamodellen simulierten raum-zeitlichen Mustern der Temperaturänderungen ergibt, dass die Änderungen nicht allein mit der natürlichen Variabilität des Klimasystems, sondern nur mit Berücksichtigung der anthropogenen Treibhausgasemissionen und Landnutzungsänderungen erklärt werden können. Eine Veränderung von Verteilung und Intensität des Niederschlags durch anthropogenen Einfluss ist neuesten Studien zufolge wahrscheinlich.
- Die anthropogen verursachte Erwärmung setzt sich fort, wobei je nach Szenario ca. 1,5 bis 4,5 °C Anstieg im globalen Mittel bis 2100 erreicht werden, gerechnet im Vergleich zur zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts (sehr wahrscheinlich).
- Natürliche Variabilität ist aber wahrscheinlich der Grund, dass trotz des starken Strahlungsantriebs die Temperatur global seit 1998 nur relativ schwach (0,04 °C / Dekade) gestiegen ist. Wahrscheinlichste Ursachen sind ein vorübergehender verstärkter Transport warmen Ozeanwassers in größere Tiefen und eine vergleichsweise schwache Sonnenfleckentätigkeit.
- Neben der globalen Erwärmung sind weitere gravierende Änderungen wie ein Anstieg des Meeresspiegels bis 2100 um ca. 0,25 bis 1,0 m (wahrscheinlich) gegenüber dem Ende des 20. Jahrhunderts, je nach Szenario und Modell, zu erwarten. Durch fortgesetzte Aufnahme von CO_2 setzt sich die Abnahme des pH-Wertes im Ozean fort, was unkalkulierbare ökologische Konsequenzen mit sich bringt. In Bezug auf den Niederschlag wird erwartet, dass er in feuchten Regionen und Jahreszeiten zunimmt und in trockenen Regionen und Jahreszeiten abnimmt, wobei sich die trockenen Regionen polwärts ausdehnen können (wahrscheinlich).
- Eine Begrenzung der globalen Erwärmung auf 2 °C, entsprechend dem RCP2.6-Pfad, setzt erhebliche Anstrengungen zur Verringerung des Ausstoßes von Treibhausgasen voraus, wobei dazu typischerweise auch Maßnahmen wie großtechnische Bindung von CO_2 aus dem Abgas oder gar aus der Atmosphäre (Carbon Capture and Storage, CCS) angenommen werden.

1.1 Einleitung
1.1 Introduction

Der erste so genannte österreichische Klimasachstandsbericht (Austrian Assessment Report) 2014 (AAR14) befasst sich vornehmlich mit Ursachen und Folgen sowie Möglichkeiten der Abmilderung des Klimawandels in Österreich. Wie auch

die bekannten Sachstandsberichte des „Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)" stellt er das Problem des Klimawandels und seiner Folgen dar. Während der 5. IPCC Sachstandsbericht (Band I zur physikalischen Basis erschien im September 2013 [IPCC, 2013], die beiden weiteren Bände folgten im Frühjahr 2014) eine Wissens- und Handlungsgrundlage für die Völkergemeinschaft bietet, ist der vorliegende Sachstandsbericht spezifisch für die Wissens- und Handlungsbedürfnisse der österreichischen Gesellschaft gedacht. Ebenso wie der IPCC-Bericht hat der AAR14 eine wichtige integrierende Funktion, indem er WissenschaftlerInnen verschiedener Disziplinen und viele Interessensgruppen miteinander in Verbindung bringt. Er ist ähnlich wie der IPCC-Bericht in drei Bände (naturwissenschaftlichen Grundlagen; Folgen, Anpassung, Verwundbarkeit; Klimaschutz) unterteilt.

Auch wenn der Sachstandsbericht auf Österreich und den Alpenraum ausgerichtet ist, kommt der vorliegende Band über die physikalischen Grundlagen des Klimawandels nicht umhin, das globale Klimasystem und seinen Wandel in einer kompakten Übersicht darzustellen. Erst der globale Blickwinkel, den dieses Kapitel bietet, macht die Klimaverhältnisse und auch Teile der Klimaforschung in Österreich verständlich. Eine detailliertere Behandlung der globalen Aspekte ist in den IPCC-Berichten (siehe insbesondere Band I des 5. Sachstandsberichts, IPCC, 2013) zu finden.

1.2 Das Klimasystem
1.2 The climate system

Die Definition des Klimasystems ist nicht eindeutig. Es ist weitgehend akzeptiert (IPCC, 2013; Hantel, 2005), dass es jene Teile der Erde enthält, die sich im Laufe von Jahrhunderten bis Jahrtausenden erheblich verändern können. Denkt man in noch längeren Zeitskalen, dann ist die gesamte Erde als Klimasystem aufzufassen, weil auch sehr langsame geophysikalische Prozesse, wie die Kontinentalverschiebung, in Betracht zu ziehen sind. Die Sonne ist nicht Teil des Klimasystems, obwohl dieses ohne sie als Energiequelle in seiner heutigen Form undenkbar wäre.

Das Klimasystem strebt ständig einen Gleichgewichtszustand zwischen eingehender solarer Strahlung und abgegebener terrestrischer Strahlung an. Ein stationärer Gleichgewichtszustand wird aber nie erreicht, weil sich die Zusammensetzung der Atmosphäre und die Eigenschaften der Erdoberfläche, aber auch die Intensität der ankommenden Sonnenstrahlung ständig ändern und die Komponenten des Klimasystems unterschiedlich rasch auf diese Änderungen reagieren.

1.2.1 Komponenten des Klimasystems

Zum Verständnis des Klimas ist es sinnvoll, die Erde in folgende Subsysteme (Sphären) einzuteilen (Hantel, 2005), wie sie auch in Abbildung 1.1 abgebildet sind:

- Atmosphäre – die Lufthülle der Erde. Sie macht mit $5{,}15 \times 10^6$ Gt nur einen winzigen Teil der von der Sonne erwärmten Masse aus, ihre Zusammensetzung, insbesondere ihr Kohlendioxid-, Wasserdampf- und Aerosolgehalt, hat jedoch wesentlichen Einfluss auf die Temperatur der Erdoberfläche, weil sie terrestrische Strahlung absorbieren und auf die Erdoberfläche zurückstrahlen kann. Ebenso können die enthaltenen Wolken und Aerosole solare Strahlung reflektieren und absorbieren. Ihre Fähigkeit, Energie und Spurenstoffe rasch über große Distanzen zu transportieren, führt zu weit geringeren Temperaturgegensätzen zwischen Tropen und Polargebieten als durch die Verteilung der einfallenden Sonnenstrahlung zu erwarten wäre. Die Atmosphäre hat nur vergleichsweise geringe Speicherkapazität für Energie, allerdings kann sie einige für den Energie- und Strahlungshaushalt sehr wesentliche Spurenstoffe wie Kohlendioxid (CO_2), Methan und Lachgas über Jahrzehnte oder noch länger speichern.
- Hydrosphäre – Wasser in Ozeanen, Seen und Flüssen, Grundwasser, aber auch Wasserdampf und Wolkentropfen. Sie hat aufgrund der hohen spezifischen Wärmekapazität des Wassers und durch ihre Masse von ca. $1{,}4 \times 10^9$ Gt eine sehr hohe Speicherkapazität für Energie, wodurch sie jahreszeitliche und auch längerfristige Temperaturschwankungen stark dämpft. Wie die Atmosphäre ist auch der Ozean ein wichtiger Speicher für klimarelevante Spurenstoffe. Auch die Hydrosphäre hat die Fähigkeit, Energie und Spurenstoffe über große Distanzen zu transportieren. Sie enthält die für das menschliche Wohlergehen so wichtigen Trink- und Nutzwasservorräte, deren Änderungen nicht nur klimabedingt, sondern auch durch Dammbauten, Bewässerung und andere direkte menschliche Eingriffe bedingt sind.
- Kryosphäre – Wasser in fester Form: Gletscher und Inlandeis, Permafrostböden, die Schneedecke, Meereis sowie gefrorene Wolken- und Niederschlagspartikel. Die Kryosphäre mit einer Masse von etwa 3×10^7 Gt wächst bzw. schrumpft auf Kosten der Hydrosphäre, indem Wasser friert oder schmilzt. In Polargebieten führt sie durch ihre hohe Albedo (Reflexionsvermögen für solare Strahlung) und ihre Fähigkeit, den Energiestrom zwischen warmem Ozean und kalter Atmosphäre zu unterbinden,

zu verstärkten Temperatur- und auch Niederschlagsschwankungen bzw. Schwankungen im Spurenstoffaustausch. Am Rückgang von Meer- und Inlandeis sowie an der Verkürzung der Schneedeckendauer lässt sich der stattfindende Klimawandel sehr deutlich ablesen.

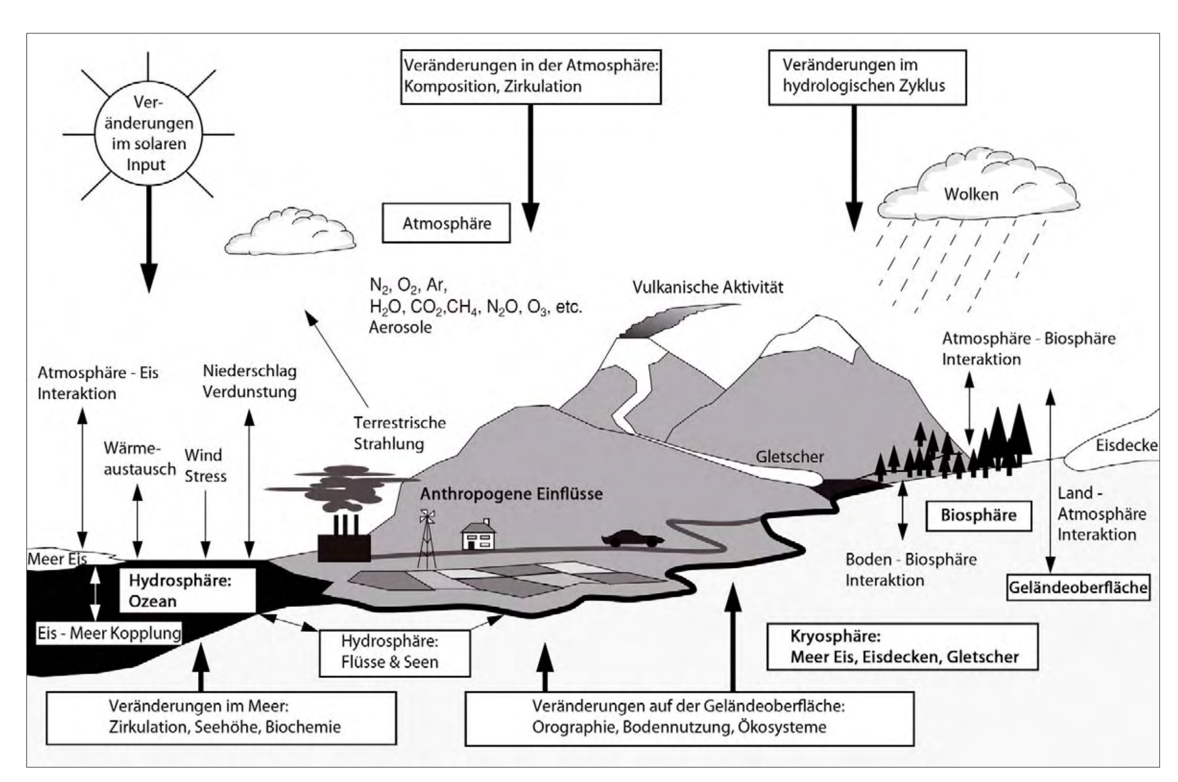
- Lithosphäre – der feste, unbelebte Teil der Erde. Sie hat trotz ihrer enormen Masse von $6{,}0 \times 10^{12}$ Gt nur relativ geringe effektive Wärmekapazität, weil Wärme nur langsam und in geringe Tiefen transportiert wird. Sie ist bei weitem das größte Reservoir von Kohlenstoff in Form von Kalk, Kohle, Erdgas und Erdöl. Während natürliche Prozesse lithosphärischen Kohlenstoff nur langsam in die Atmosphäre freisetzen können, geschieht dies durch anthropogene Prozesse wie Verbrennung und Zement- bzw. Kalkproduktion in vergleichsweise kurzer Zeit. Auch ihre sonstige chemische Zusammensetzung und ihre Topographie haben starke Auswirkung auf das Klima, vor allem regional und lokal, sowie auf die darauf befindliche Biosphäre.
- Biosphäre – Flora und Fauna, die sich in den vier obigen Sphären findet. Auch der Mensch ist als Teil der Biosphäre zu betrachten. Trotz ihrer relativ geringen Masse von ca. $1{,}8 \times 10^{3}$ Gt hat sie durch ihre Fähigkeit, wichtige Spurenstoffkreisläufe wie den von CO_2, CH_4 und anderen zu kontrollieren, große Bedeutung für das globale Klima. Menschliche Aktivitäten verändern die Biosphäre direkt durch Landnutzung oder Verbauung, aber auch indirekt durch die Emission von Spurengasen und deren Folgen.

Ein wesentlicher Teil der Klimaforschung beschäftigt sich mit der Bestimmung der Reservoirs und der Flüsse von klimarelevanten Substanzen zwischen den Subsystemen (Abbildung 1.1). Hier werden Energie-, Wasser- und Kohlenstoffkreisläufe behandelt.

1.2.2 Globale Haushalte von Energie, Wasser und Kohlenstoff

Durch Messung meteorologischer Größen wie Temperatur, Druck, Feuchtegehalt, Salzgehalt oder Wind bzw. Strömungen lässt sich der lokale, spezifische Energiegehalt von Atmosphäre und Ozean bestimmen. Flussgrößen wie Wärmetransporte, Niederschlag oder Phasenumwandlungen von Wasser sind Teil des Energiekreislaufs im Klimasystem. Eine wissenschaftliche Betrachtung der Energiebilanzen erfordert die Bestimmung auch schwer messbarer Zustands- und Flussgrößen, damit die Bilanzen geschlossen sind (Haimberger, 2005). Mit geschlossenen Bilanzen werden Konsistenzprüfungen und Unsicherheitsabschätzungen möglich, die wiederum für die Validierung von Klimamodellen relevant sind. Die Art und Weise wie die von der Sonne erhaltene Energie durch das Klimasystem der Erde fließt, bevor sie den Planeten wieder verlässt, erlaubt ein tieferes Verständnis der Vorgänge im Klimasystem (zu Details des Strahlungsaustauschs siehe Abschnitt 1.2.3). Die Sonnenenergie dringt zunächst als solare Strahlung ins Klimasystem (Abbildung 1.1; Houghton et al., 2001). Ein wesentlicher Teil der einfallenden Strahlung wird in fühlbare Wärme, latente Wärme und in kinetische Energie umgewandelt (97 W/m^2 in Abbildung 1.2; Trenberth et al., 2009), und dann mit den globalen Zirkulationssystemen in Atmosphäre und Ozean innerhalb des Klimasystems umverteilt. Ein großer Teil der von der Erdoberfläche emittierten terrestrischen Strahlung wird in der Atmosphäre absorbiert und wieder zurückgestrahlt (333 W/m^2, vgl. Abbildung 1.2). Das ist die Manifestation des Treibhauseffekts im Klimasystem. Eine Zunahme der Treibhausgase verstärkt diesen Fluss und führt damit zu einer Erwärmung an der Erdoberfläche. Ein verhältnismäßig geringer Teil der Energie wird von der Biosphäre aufgenommen, z. B. um Photosynthese zu betreiben. Sehr wesentlich ist auch der Haushalt der solaren Strahlung (Pfeile links in Abbildung 1.2). Verstärkte Reflexion von Sonnenlicht durch Zunahme von Wolken oder Aerosolen in der Atmosphäre kann die Erwärmung an der Erdoberfläche abschwächen oder sogar zu einer Abkühlung an der Erdoberfläche führen. Schließlich wird die Energie vom Klimasystem als terrestrische Strahlung wieder in den Weltraum abgestrahlt. Solare Einstrahlung (0,3–3 µm Wellenlänge) und terrestrische Ausstrahlung (3–100 µm Wellenlänge) halten sich im Mittel über einige Jahre die Waage, wenn sich das Klimasystem im globalen Gleichgewicht befindet.

Wird aber die terrestrische Ausstrahlung abgeschwächt, z. B. durch Zunahme von strahlungsaktiven Spurengasen (Treibhausgase, siehe Abschnitt 1.2.3), kann das zu einer Nettoenergiezufuhr ins Klimasystem führen (vgl. Abschnitt 1.2.3, Definition des Strahlungsantriebs). Diese Zufuhr beträgt derzeit 0,9 W/m^2 (nach Schätzungen von Fasullo und Trenberth, 2008; vgl. Abbildung 1.2), bzw. $0{,}5 \pm 0{,}43$ W/m^2 nach neuesten Schätzungen von Loeb et al. (2012). Dieser Fluss erwärmt vor allem die Ozeane (siehe Abschnitt 1.3.3) und die Kryosphäre, die eine hohe Energiespeicherkapazität haben, und hält so lange an, bis der Strahlungshaushalt wieder ausgeglichen ist – dann allerdings bei höherer Erdoberflächentemperatur. Wegen seiner Bedeutung für den Klimawandel wird auf den Strahlungshaushalt der Erde in Abschnitt 1.2.3 ausführlich eingegangen.



Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Figure 1.1. Cambridge University Press

Abbildung 1.1 Darstellung der Klimasubsysteme (Rechtecke, fett), deren Wechselwirkungen (dünne Pfeile, normaler Text) und einige Aspekte, die sich im Lauf der Jahre ändern (dicke Pfeile). Für die Atmosphäre sind die für den Strahlungshaushalt hauptsächlich relevanten Spurengase und Aerosole aufgezählt. Quelle: Houghton et al. (2001)

Figure 1.1 Graphical overview over climate subsystems (boxes, bold font), their exchanges (thin arrows, normal font) and some aspects which change (thick arrows). The most relevant trace gases and aerosols are mentioned. Source: Houghton et al. (2001)

Die Sonne verteilt die Energie höchst ungleich, worauf das Klimasystem mit einem polwärtigen Transport von Energie, vor allem fühlbarer und latenter Wärme, in Atmosphäre und Ozean reagiert, der die Tropen kühlt und die Polargebiete erwärmt. Detaillierte Untersuchungen des Energiehaushalts und seiner Variabilität in den letzten 30 Jahren wurden u. a. von Mayer und Haimberger (2012) durchgeführt. Trends in den globalen Energiehaushalten sind wichtige Indikatoren für Klimaänderungen, auch wenn sie mit dem derzeitigen Beobachtungssystem nur mit Vorsicht und auf der globalen Skala interpretierbar sind.

Neben dem Energiehaushalt spielt der Wasserhaushalt eine zentrale Rolle. Wasser gelangt vom großen Ozeanreservoir durch Verdunstung hauptsächlich in den Subtropen in die Atmosphäre und wird von dort in die Tropen und die mittleren Breiten transportiert, wo der Niederschlag die Verdunstung übertrifft. Wasserdampf ist das wichtigste Treibhausgas. Es wird aber bei den Treibern des anthropogenen Klimawandels in der Regel nicht angeführt, da seine atmosphärische Konzentration (zumindest in der Troposphäre) nicht signifikant durch anthropogene Emissionen von Wasserdampf selbst beeinflusst wird und überdies seine Verweildauer kurz ist. Der zunehmende Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre bei steigender Temperatur führt wegen der verstärkten Gegenstrahlung und der Verschiebung von latentem zu fühlbarem Wärmestrom zu einer positiven Rückkoppelung und verstärkt somit die durch unmittelbar emittierte, langlebige Treibhausgase verursachte Erwärmung. Dementsprechend wichtig ist eine genaue Beobachtung des globalen Wasserdampfgehalts. Ebenso wichtig ist natürlich die Beobachtung des Nettotransports von Wasser aus den Ozeanen in die Atmosphäre (Verdunstung minus Niederschlag auf die Ozeane), der horizontalen Transporte in der Atmosphäre und schließlich des auf das Festland fallenden Niederschlags, welcher dann durch den Abfluss in Flüssen und Grundwasserströmungen wieder ausgeglichen wird. Es gibt Anzeichen und auch theoretische Überlegungen (Held und Soden, 2006), dass sich der Wasserkreislauf im Zuge des derzeit stattfindenden Klimawandels verstärken könnte, womit stärkere Feuchtetransporte und auch Niederschläge zu erwarten wären. Eine detaillierte quantitative Aufschlüsse-

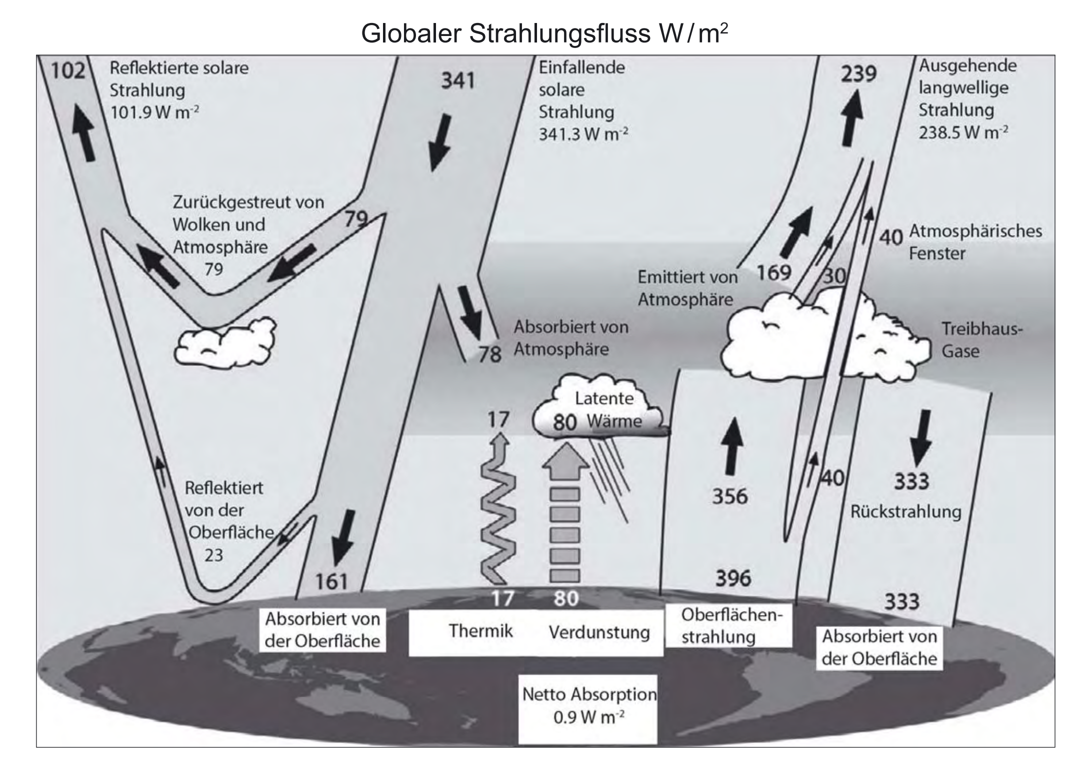


Abbildung 1.2 Energiebilanz der Atmosphäre gemittelt über die Jahre 2000 bis 2004 nach Trenberth et al. (2009). Man beachte, dass nach diesen Autoren etwa 0,9 W/m² netto absorbiert werden und nicht in den Weltraum zurückgestrahlt werden. Man beachte auch, dass die Erde hier gesamthaft betrachtet wird und es sich bei den Zahlen um globale Mittelwerte über mehrere Jahre handelt, wobei die lokalen, kurzfristigen Werte der Flüsse erheblich abweichen und sogar das Vorzeichen wechseln können. Ein umfassendes Beobachtungssystem ist daher für eine ausreichend genaue Erfassung dieser Energiebilanz essenziell. Quelle: Trenberth et al. (2009)

Figure 1.2 Global atmospheric energy budget of the atmosphere, averaged over years 2000–2004 after Trenberth et al. (2009). According to those authors about 0.9 W/m² are absorbed by the climate system and are not radiated back to space. Note also that this is a global mean view averaged over several years. Local short term fluxes can deviate substantially and even change the sign. A comprehensive observing system is necessary for a sufficiently accurate assessment of the energy budget. Source: Trenberth et al. (2009)

lung des Wasserhaushalts findet man z. B. bei Trenberth et al. (2011). Noch mehr Details, beispielsweise Karten der globalen Niederschlagsverteilung findet man z. B. bei Hantel (2005). Die global gemittelten Größen des Wasserkreislaufs, insbesondere Wasserdampfgehalt (Fehler im Prozentbereich) oder Wasserdampftransporte (Fehler im 10 %-Bereich), sind auch mit dem modernen globalen Beobachtungssystem nur relativ ungenau bekannt. Dennoch liefern Auswertungen des Wasserkreislaufs wichtige Referenzwerte für die Verifikation von Klimamodellen.

Die Betrachtung der Energie- und Wasserzyklen reicht nicht aus, um den beobachteten Anstieg der Treibhausgase in der Atmosphäre zu erklären. Dazu ist die Betrachtung biogeochemischer Kreisläufe, insbesondere des in Le Quéré et al. (2013) abgebildeten Kohlenstoffkreislaufs (carbon cycle) notwendig. Er umfasst alle Stoffwechselvorgänge, an denen Kohlenstoff beteiligt ist. Das beinhaltet Prozesse wie Photosynthese, Atmung, Speicherung und Respiration im Ozean. Ähnlich wie bei der Energie enthält die Atmosphäre ein vergleichsweise kleines Kohlenstoffreservoir. Der bei weitem meiste Kohlenstoff ist in kohlenstoffhaltigen Mineralien wie Kalkstein ($CaCO_3$) gebunden. Bei natürlichen Prozessen wird seit der letzten Eiszeit nur verhältnismäßig wenig lithosphärischer Kohlenstoff freigesetzt, etwa durch Vulkanismus oder Erosion von Kalkgestein. Vor allem seit dem Zweiten Weltkrieg ist im atmosphärischen Kohlenstoffzyklus allerdings eine große und zunehmende anthropogene Quelle entstanden, die sich hauptsächlich aus Verbrennung von der Lithosphäre entnommenen fossilen Energieträgern (Kohle, Erdöl, Erdgas), Zementproduktion und Landnutzungsänderung zusammensetzt. Landnutzungsänderungen umfassen z. B. die Abholzung von Wäldern (CO_2-Quelle) oder die Zunahme der Viehwirtschaft und von Stauseen (Methanquellen).

Während die anthropogenen Quellen relativ genau bekannt sind, sind die zusätzlichen Senken im Kohlenstoffkreislauf wesentlich ungenauer bestimmbar. Dies liegt an den starken

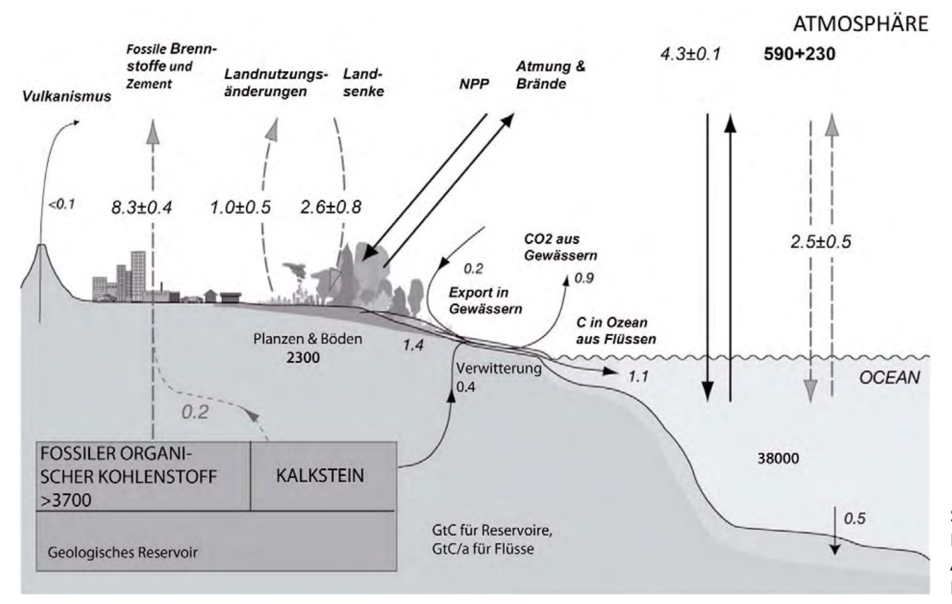


Abbildung 1.3 Global gemittelte Kohlenstoff-Flüsse (fast ausschließlich CO_2 und Methan, in Gt C/Jahr) und Kohlenstoff-Reservoirs (in Gt C) nach Sarmiento und Gruber (2006; Abb. 10.1.1), aktualisiert mit Daten von Le Quéré et al. (2013). Durchgezogene Pfeile sind natürlich vorkommende Flüsse, strichliert sind anthropogene Flüsse für 2011. Reservoirgrößen in Normalschrift, bei der Atmosphäre ist auch die Zunahme (230 Gt C seit ca. 1800) angegeben. Die kursiven Zahlen sind Nettoflüsse in Gt C/Jahr. Hinweis: Manchmal findet man in der Literatur als Einheit für Flüsse auch die Einheit Gt CO_2/Jahr. Dabei entsprechen 11/3 Gt CO_2/Jahr 1 Gt C/Jahr. Der Faktor 11/3 ergibt sich aus dem Verhältnis der Molmassen von CO_2 (44) und C (12). Quelle: Sarmiento und Gruber (2006)

Figure 1.3 Global mean carbon fluxes (almost exclusively CO_2 and Methane, in Gt C/a) and carbon reservoirs (in Gt C) after Sarmiento and Gruber (2006, their figure 10.1.1), updated with data from Le Quéré et al. (2013). Solid arrows are natural fluxes, dashed arrows are anthropogenic fluxes for 2011. Reservoir sizes in normal fonts, for the atmosphere also the increase since 1800 (230 Gt C) is specified. The numbers in italic are net fluxes in Gt C/a. Remark: In the literature one often finds Gt CO_2/a as units for fluxes. 11/3 Gt CO_2/a correspond to 1 Gt C/a, where 11/3 is the ratio between the molar masses of CO_2 (44) and C (12), respectively. Source: Sarmiento and Gruber (2006)

individuellen natürlichen Flüssen zwischen den Klimasubsystemen. Der Kohlenstofffluss aus der Atmosphäre in die Biosphäre durch Nettoprimärproduktion (im wesentlichen Photosynthese) in der Größenordnung von 100 Gt C/Jahr wird durch einen nicht ganz so starken Fluss in die Atmosphäre durch Atmung/Verbrennung weitgehend ausgeglichen. In Abbildung 1.3 ist nur die Nettobilanz (Landsenke) eingetragen. Ähnlich verhält es sich zwischen Atmosphäre und Ozean, wo regional sehr große Kohlenstoffflüsse stattfinden, die sich im Mittel aber weitgehend kompensieren, sodass nur ein relativ kleiner Residualfluss (Ozeansenke) übrigbleibt.

Durch den wegen der anthropogenen Quellen steigenden atmosphärischen CO_2-Gehalt werden auch die natürlichen Senken aktiver, insbesondere vermehrte Photosynthese sowie vermehrte Lösung von CO_2 in den Ozeanen (siehe Abschnitt 1.3.2). Man beachte aber, dass die Kohlenstoffbilanz der Atmosphäre trotz der zunehmenden Senken einen deutlichen Überschuss aufweist (5 Gt C/Jahr, vgl. Abbildung 1.3 nach neuesten Schätzungen von Peters et al., 2011). Dies ist konsistent mit der stetigen Zunahme des CO_2-Gehalts der Atmosphäre. Die gesamten anthropogenen CO_2-Emissionen seit 1870 betrugen etwa 400 Gt C. Der Kohlenstoffgehalt der Atmosphäre insgesamt ist seit 1870 um 230 Gt C (+39 % gegenüber vorindustrieller Zeit) angestiegen. Das zweitwichtigste Treibhausgas, Methan, hat seine Konzentration seit 1870 sogar mehr als verdoppelt. Wie sich dies auf den Strahlungshaushalt der Atmosphäre auswirkt, ist in Abschnitt 1.2.3 beschrieben.

Die Lösung von CO_2 im Ozean impliziert die vermehrte Bildung von Kohlensäure und hat damit eine Senkung des pH-Wertes im Ozean zur Folge (Versauerung der Ozeane). Dies ist eine beunruhigende Veränderung der Lebensbedingungen für viele Organismen im Ozean. Die dauerhafte Bindung und Ausfällung von CO_2 als Kalkstein geht sehr langsam vor sich (0,5 Gt C/Jahr) und reicht nicht aus, um eine Anreicherung des gelösten CO_2 im Ozean zu verhindern.

1.2.3 Strahlungshaushalt, Treibhauseffekt und Wirkung von atmosphärischen Spurenstoffen

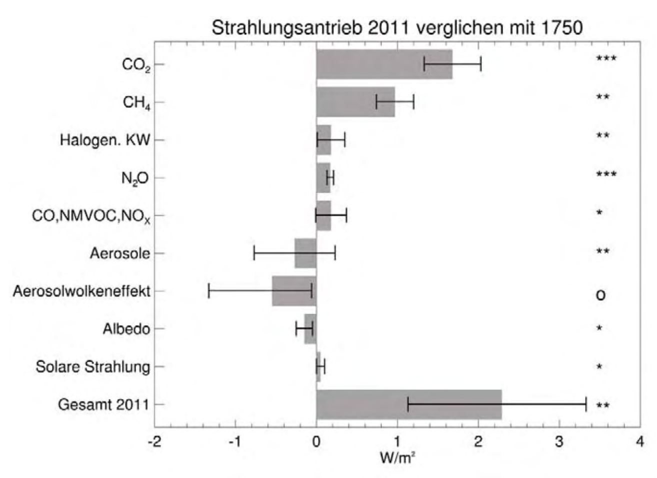
Bei Planeten, deren interne Energieerzeugung vernachlässigbar ist, herrscht ein annäherndes Gleichgewicht zwischen von der Sonne empfangener Strahlungsenergie und emittierter terrestrischer Strahlungsenergie. Dies trifft im Prinzip auch auf

die Erde zu (Fasullo und Trenberth, 2008; Loeb et al., 2012), durch den anthropogenen Treibhauseffekt gibt es aber eine systematische Abweichung (mehr siehe unten), sowie starke Schwankungen von Jahr zu Jahr. Diese nehmen derzeit Werte von 0,3–1,5 W/m² an (Bild 2.12 in IPCC, 2013; Loeb et al., 2012; Trenberth and Fasullo, 2013) und stehen in Zusammenhang mit globalen Wetterphänomenen, die Bewölkung und Temperatur beeinflussen, wie beispielsweise El Niño. Grundsätzlich steht der Energiezufuhr im solaren Spektralbereich eine Energieabgabe im terrestrischen Spektralbereich gegenüber: Die der Sonne zugewandte Seite der Erde empfängt die kurzwellige Strahlung der Sonne, ein Teil dieser Energie wird durch die Wolken, an der Erdoberfläche und von der Atmosphäre selbst in Richtung Weltraum zurück reflektiert bzw. gestreut. Die von der Erde absorbierte solare Strahlung hängt daher von der Intensität der Sonnenstrahlung, der sogenannten Solarkonstanten, ab und vom Anteil der in den Weltraum reflektierten Energie, der sogenannten planetaren Albedo.

Die Erde emittiert weiters terrestrische Strahlung in den Weltraum, jedoch gelangt nur ein Teil der von der Erdoberfläche emittierten Strahlung direkt in den Weltraum. Ein Großteil wird in der Atmosphäre absorbiert und in Richtung Erdboden oder Weltraum re-emittiert (siehe Abbildung 1.2). Die in zum Erdboden re-emittierte Strahlungsenergie wird als atmosphärische Gegenstrahlung bezeichnet. Die Durchlässigkeit der Atmosphäre für terrestrische Strahlung sowie die atmosphärische Gegenstrahlung hängen von der Bewölkung und der Zusammensetzung der Atmosphäre ab.

Der Strahlungsantrieb („radiative forcing") ist ein Maß für die Störung des Gleichgewichts zwischen empfangener Solarstrahlung und in den Weltraum abgegebener terrestrischer Strahlung. Der Strahlungsantrieb bezieht sich auf die Energiebilanz an der Tropopause und hat die Maßeinheit Watt pro Quadratmeter (W/m²). Der vom IPCC-Bericht 2013 (IPCC, 2013) abgeschätzte Strahlungsantrieb der einzelnen Atmosphärenkomponenten ist aus Abbildung 1.4 ersichtlich. Der gesamte anthropogene Strahlungsantrieb machte im Jahr 2011 2,29 [1,13–3,33] W/m² aus. Bei der Berechnung des Strahlungsantriebs wird die erhöhte Abstrahlung zufolge einer bereits eingetretenen Erwärmung der Erdoberfläche nicht berücksichtigt (Forster et al., 2007). Aus diesem Grund ist er höher als das derzeit beobachtete Energieungleichgewicht von 0,9 W/m² in Abbildung 1.2.

Es gibt drei Größen, die den Energieaustausch der Erde mit dem Weltraum und somit den Strahlungsantrieb und die mittlere Oberflächentemperatur der Erde beeinflussen können: die Solarkonstante, die planetare Albedo und der Treibhauseffekt.



Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Figure TS.7. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

Abbildung 1.4 Überblick über den Beitrag verschiedener Komponenten zum Strahlungsantrieb der Erde bei der Zusammensetzung der Erdatmosphäre wie sie im Jahr 2011 gegeben war, verglichen mit dem vorindustriellen Strahlungsantrieb (0 W/m²) um 1750 (IPCC, 2013). Links steht der Name der jeweiligen Komponente, der Balken stellt den kombinierten Strahlungsantrieb dar (primäre und sekundäre Effekte, z. B. wird zunehmender stratosphärischer Wasserdampf zum Methaneffekt gezählt). Die Fehlerbalken geben das 5–95 % Vertrauensintervall an. Die Sterne deuten das wissenschaftliche Verständnis des Effekts an (o = niedrig, * = mittel, ** = hoch, *** = sehr hoch). Abkürzungen: Halogen. KW = halogenierte Kohlenwasserstoffe, NMVOC = non-methane volatile organic compounds (flüchtige organische Verbindungen ausgenommen Methan), NO_x = Stickstoffoxide. „Aerosole" bezeichnet den direkten Strahlungseffekt von Aerosolen, „Aerosolwolkeneffekt" den indirekten Effekt von Aerosol über veränderte Häufigkeit und optische Eigenschaften von Wolken. Albedo = Strahlungseffekt durch Landnutzungsänderungen, Solare Strahlung = Antrieb durch Änderung der solaren Strahlung seit 1750. Quelle: nach IPCC (2013)

Figure 1.4 Overview over the effect of different anthropogenic radiative forcing agents in 2011 compared to 1750 when the radiative forcing was 0 W/m² (IPCC, 2013). Left: Name of agent, the bars denote the combined radiative forcing of the agent (primary plus secondary effect, e.g. increased stratospheric water vapour through methane oxidation is added to methane effect). Error bars indicate 5–95 % confidence intervals. Stars denote level of scientific understanding (o = low, * = medium, ** = high, *** = very high). Halogen. KW = Halocarbons, NMVOC = non-methane volatile organic compounds, NO_x = nitric oxides, „Aerosole" contains direct radiative effect of aerosols. „Aerosolwolkeneffekt" is the indirect effect of aerosols through changed frequency and optical properties of clouds. Albedo = forcing through land use change. „Solare Strahlung" = change of solar irradiance since 1750. Source: adapted from IPCC (2013)

Die Solarkonstante

Der Strahlungsfluss (Strahlungsenergie pro Flächen- und Zeiteinheit) von der Sonne an der äußeren Grenze der Erdatmosphäre auf eine senkrecht zur Einfallsrichtung stehende Flä-

che beträgt im Jahresmittel 1 361 W / m^2 (neuester Wert nach Kopp und Lean, 2011).

Kurzfristige Schwankungen der Sonnenintensität im Bereich von 0,3 % stehen mit der Sonnenfleckenaktivität in Verbindung und gehören zu den natürlichen Einflussfaktoren auf das Klima. Während des sogenannten Maunder-Minimums zwischen 1650 und 1710 wurden nahezu keine Sonnenflecken beobachtet. Die Zeit zwischen 1800 und 1830 (Dalton-Minimum) war auch durch eine geringe Fleckenanzahl gekennzeichnet. Von der so genannten kleinen Eiszeit, mit den kältesten Temperaturen um 1700 und 1850 (siehe auch Band 1, Kapitel 3), wird angenommen, dass sie mit diesen Sonnenfleckenminima in Verbindung steht. Während für die vorindustrielle Zeit Vulkaneruptionen und die Variabilität der Sonnenaktivität einen wesentlichen Teil der Temperaturvariationen erklären können, ist das seit Mitte des 19. Jahrhunderts nicht mehr der Fall (Eichler et al., 2009).

Die Variabilität des Strahlungsantriebs durch Änderungen der Solarkonstante während der letzten 400 Jahre dürfte unter 0,5 W / m^2 liegen (Lean et al., 1995: 0,45 W / m^2; Wang et al., 2005: 0,1 W / m^2). Im Vergleich zu 1750 dürfte der Strahlungsantrieb, der auf eine Veränderung der Solarkonstante zurückgeht, nur 0,05 [0,00–0,10] W / m^2 ausmachen (IPCC, 2013).

Die planetare Albedo

Die mittlere Albedo der Erde wird als planetare Albedo bezeichnet. Sie gibt das Verhältnis von die Erde verlassender zu eintreffender kurzwelliger Strahlung am Oberrand der Atmosphäre an und beträgt ca. 29 % (Kim und Ramanathan, 2012). Die zum Weltraum gerichtete Strahlung setzt sich aus der an Wolken und am Boden reflektierten Strahlung und der in der Atmosphäre durch Luftmoleküle und Aerosole zurück gestreuten Strahlung zusammen. Änderungen dieser drei Komponenten können somit zu einem negativen oder positiven Strahlungsantrieb führen.

Aus der Gleichung für die Energiebilanz der Erde im Austausch mit dem Weltraum (Möller, 1973) lässt sich ableiten, dass eine Änderung der planetaren Albedo um 1 % zu einer Änderung der Strahlungsbilanz der Erde von ca. 13,6 W / m^2 und in weiterer Folge zu einer Änderung der effektiven Strahlungstemperatur der Erde von 1 °C führen würde (Forster et al., 2007).

Die genaue Ermittlung und kontinuierliche Beobachtungen der planetaren Albedo sind für die Erforschung des Klimawandels ganz besonders wichtig. Die Verringerung der Inlandeisflächen und des Meereises in den Polarregionen könnte die planetare Albedo beträchtlich beeinflussen (Flanner et al., 2011; Pitman et al., 2011). Der durch das Schmelzen der Gletscher und Eisflächen verursachte Strahlungsantrieb während der letzten 30 Jahre wird auf 0,45 W / m^2 geschätzt (Flanner et. al., 2011). Andere Wissenschaftler (Hansen et al., 2000; Hansen und Nazarenko, 2004) haben darauf hingewiesen, dass die Zunahme von Ruß in der Atmosphäre und speziell von Rußpartikeln in Schnee und Eis die Reflexion an Eis- und Gletscherflächen stark reduzieren und global, allein durch Veränderung der planetaren Albedo, zu einem positiven Strahlungsantrieb um die 0,1 W / m^2 führen könnte.

Simulationen (z. B. Snyder et al., 2004) zeigen, dass eine eventuelle Zunahme der Waldflächen in nördlichen Breiten (über 70°N) eher zu einer Erwärmung unseres Klimasystems führen würde. Der erwärmende Faktor ist dabei die Verringerung der Albedo, wobei diese die kühlenden Effekte der CO_2-Aufnahme und der Abgabe latenter Wärme durch den Wald übertreffen würde. Vermehrung von Waldflächen in tropischen Gebieten würde im Gegensatz dazu eindeutig zu einer Abkühlung führen, primär durch die Erhöhung der Verdunstung. Forster et al. (2007) geben einen ausführlichen Überblick über den Stand des Wissens auf diesem Gebiet. Demnach ist relativ zu 1750 ein negativer Strahlungsantrieb durch Zunahme der Albedo zufolge von Landnutzungsänderungen (Klein Goldewijk, 2001) zu beobachten, der −0,15 [−0,25 bis −0,05] W / m^2 beträgt. Diese Änderungen betreffen vorwiegend mittlere Breiten.

Der Einfluss von Aerosolen auf die planetare Albedo bzw. den Strahlungsantrieb ist komplex (IPCC, 2013). Derzeit unterscheidet man zwischen dem direkten, dem indirekten und dem semidirekten Aerosoleffekt. Der direkte Effekt ist durch die optischen Eigenschaften der Partikel bedingt. Alle Aerosolpartikel (auch die absorbierenden) streuen solare Strahlung, womit sie zu einer Erhöhung der planetaren Albedo beitragen und somit einen negativen Strahlungsantrieb verursachen. Bei stark absorbierenden Partikeln (vor allem Ruß) überwiegt jedoch der Erwärmungseffekt. Je nach Anteil der verschiedenen Arten von Aerosolpartikeln wird der negative Strahlungsantrieb abgeschwächt oder kann sogar in einen positiven Antrieb umschlagen. Die wichtigsten absorbierenden Aerosole stammen aus Verbrennungsprozessen sowie aus Erosion (Mineralstaub; Tegen, 2003). Rußemissionen aus fossilen Brennstoffen sind im Hinblick auf ihre Klimawirksamkeit schon lange Thema der Forschung (Jacobson, 2010). In den letzten Jahren richtete sich das Augenmerk verstärkt auch auf den so genannten braunen Kohlenstoff, der vor allem bei Biomassefeuern emittiert wird. Dieser braune Kohlenstoff hat ein geringeres Absorptionsvermögen als Ruß aus fossilen Brennstoffen und es

nimmt mit zunehmender Wellenlänge stark ab (Andreae und Gelencsér, 2006). Der direkte Strahlungsantrieb von anthropogenen Aerosolen wird auf –0,27 [–0,77 bis 0,23] W/m² geschätzt (IPCC, 2013).

Der indirekte Effekt von Aerosolen wird über die Änderungen der mikrophysikalischen Eigenschaften von Wolken verursacht (Haywood et al., 2011). Eine Erhöhung der Konzentration von Wolkenkondensationskernen durch anthropogene Prozesse kann die Konzentration von Wolkentröpfchen erhöhen, wobei sich gleichzeitig deren mittlere Größe verringert. Dies kann einerseits vor allem bei dünnen Wolken die Wolkenalbedo erhöhen und andererseits zu längerer Lebensdauer der Wolken führen. Beides bewirkt einen negativen Strahlungsantrieb. Wolkenkondensationskerne, die solare Strahlung absorbieren, erhöhen das Absorptionsvermögen der Wolken und verringern so den negativen Strahlungsantrieb. Der indirekte Effekt der anthropogenen Aerosole wird auch Aerosolwolkeneffekt genannt und im 5. IPCC-Bericht mit –0,55 [–1,33 bis –0,06] W/m² angegeben, wobei die immer noch große Unsicherheit gegenüber dem 4. IPCC-Bericht wesentlich kleiner geworden ist. Noch größere Unsicherheiten gibt es beim so genannten semi-direkten Effekt, d. h. dem Einfluss von absorbierenden Aerosolen auf die Stabilität der Grenzschicht (Jacobson, 2010). Strahlungsabsorption führt zu Erwärmung einer Aerosolschicht. Wenn sich Aerosole am Oberrand der Grenzschicht ansammeln, wird die Schichtung damit stabiler und die Bildung konvektiver Wolken kann behindert bzw. unterdrückt werden. Wolken mit absorbierenden Substanzen in den Tröpfchen können sich aufgrund der davon bewirkten Erwärmung (rascher) auflösen. Neueste Schätzungen beziffern den gesamten Strahlungsantrieb von anthropogenem Ruß (inkl. braunem Kohlenstoff) in der Atmosphäre und auf Eis- und Schneeflächen mit +1,1 [0.17–2.10] W/m² (Bond et al., 2013).

Das Phänomen des so genannten „global dimming“ steht mit der anthropogenen Erhöhung der atmosphärischen Aerosolkonzentration sowie mit der Erhöhung der Wolkenalbedo in Zusammenhang. Weltweit wurde zwischen den Jahren 1958 und 1992 eine Abnahme der Globalstrahlung zwischen 12 und 58 W/m² beobachtet (Stanhill und Cohen, 2001). Dieser negative Trend der Globalstrahlung hat sich Mitte der 1980er Jahre (Wild, 2012) umgekehrt („global brightening“) und wird durch die Verbesserung der Luftqualität erklärt.

Der Treibhauseffekt

Aus der von der Erde in den Weltraum emittierten Strahlung lässt sich nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz eine effektive Strahlungstemperatur von 254 K (−19 °C) errechnen. Diese effektive Strahlungstemperatur entspricht der von einem Beobachter im Weltraum gemessenen Temperatur der Erde. Sie wird über die in den Weltraum emittierte Strahlung der Erde bestimmt, welche hauptsächlich von den kälteren höheren Schichten der Atmosphäre stammt. Die mittlere Temperatur an der Erdoberfläche, gemittelt über alle Breiten und Jahreszeiten, ist aber mit 14 °C (287 K) im Mittel über 1961–1990 (berechnet aus HadCRUT4; Morice et al., 2012) wesentlich höher. Für den Unterschied ist die Zusammensetzung der Atmosphäre verantwortlich. Die Erdoberfläche strahlt nicht unmittelbar in den Weltraum ab, denn die Gase und Wolken in der Atmosphäre absorbieren im terrestrischen Wellenlängenbereich und strahlen in Abhängigkeit ihrer eigenen Temperatur wieder in alle Richtungen ab. Je höher die Aerosol- und Treibhausgaskonzentration ist, desto geringer ist die Durchlässigkeit für die emittierte terrestrische Strahlung und desto höher ist die atmosphärische Gegenstrahlung. Da die von der Erde aufgenommene Energie nicht mehr vollständig abgeführt werden kann, kommt es zu einer Erhöhung der Oberflächentemperatur der Erde, bis ein neues Gleichgewicht – auf höherem Temperaturniveau – erreicht ist.

Als Treibhausgase werden jene Gase bezeichnet, die langwellige Emission der Bodenoberfläche Richtung Weltraum durch Absorption und Re-emission Richtung Boden und Richtung Weltraum stark reduzieren. Ein Bereich zwischen 8 und 14 µm, der als „atmosphärisches Fenster“ bezeichnet wird, ist für die vom Boden emittierte terrestrische Strahlung im Wesentlichen durchlässig, während im übrigen Bereich die vom Boden emittierte terrestrische Strahlung in der Atmosphäre vollständig absorbiert wird. Treibhausgase, welche zum anthropogen verursachtem Treibhauseffekt beitragen, weisen Absorptionsbanden im atmosphärischen Fenster auf; zu diesen Gasen zählen Kohlendioxid (CO_2), Lachgas, (N_2O), Methan (CH_4), Ozon (O_3), Fluorchlorkohlenwasserstoffe, Schwefelhexafluorid (SF_6), aber auch Wasserdampf (H_2O).

Der Wasserdampf trägt ca. 60 % zum natürlichen Treibhauseffekt unserer Erde bei. Seine Rolle verdient eine detailliertere Betrachtung. Wasserdampf ist ein in der Luft natürlich vorkommendes Gas; die durch menschliche Aktivitäten direkt emittierten Mengen sind im Vergleich dazu auf globaler Ebene vernachlässigbar. Wasserdampf zählt daher nicht zu den Treibern (englisch: „forcings“) des anthropogenen Treibhauseffekts. Die atmosphärische Wasserdampfkonzentration reagiert jedoch auf die Lufttemperatur: höhere Temperaturen lassen die Menge von Wasserdampf in der Atmosphäre ansteigen, was zu weiterer Erwärmung führt. Dies bedeutet eine positive Rückkopplung im Klimasystem (Soden und Held,

2006; Sherwood et al., 2010). In der Stratosphäre ist aufgrund der tiefen Temperatur und wegen der Sperrwirkung der Tropopause nur sehr wenig Wasserdampf vorhanden. Dieser hat aber eine lange Verweildauer und hat unmittelbar Einfluss auf die Strahlungsbilanz der Erde, da die Stratosphäre – anders als große Teile der Troposphäre – für terrestrische Strahlung in den Absorptions- / Emissionsbereichen des Wasserdampfs transparent ist. Der anthropogene Eintrag von Wasserdampf geht in diesen Höhen vor allem auf den Abbau von Methan zurück, er wird aber auch durch den Flugverkehr direkt emittiert. In Abbildung 1.4 ist deswegen nur der Strahlungsantrieb des stratosphärischen Wasserdampfes angegeben, und zwar als Teil des Strahlungsantriebs von Methan, wobei sein Betrag mit ca. 0,2 W / m² beziffert wird.

Das globale Erwärmungspotenzial (auch Treibhauspotenzial, englisch: global warming potential, GWP) ist eine mengenspezifische Maßzahl für die Treibhauswirksamkeit der einzelnen Treibhausgase im Vergleich zu CO_2. Verglichen wird der über eine vorgegebene Zeitperiode integrierte Strahlungsantrieb, hervorgerufen durch die einmalige Emission einer Masseneinheit des jeweiligen Treibhausgases. Die Wirksamkeit eines Kilogramms CH_4 (aus biogenem Ursprung) beträgt integriert über 100 Jahre das 28-fache, jene eines Kilogramms N_2O das 265-fache dessen der gleichen Masse CO_2. Je nach Verbindung kann das GWP von fluorierten Gasen noch deutlich höher liegen. Für Schwefelhexafluorid etwa gilt ein Wert von 23 500. Die gewählte Integrationsperiode von 100 Jahren hat keine physikalische Bedeutung, wird aber in der Praxis häufig verwendet. Bezogen auf eine Periode von 20 Jahren wäre die Bedeutung eines weniger langlebigen Gases wie Methan noch deutlich höher (84-facher Wert von CO_2). Alle diese Daten stammen aus dem jüngsten 5. Sachstandsbericht von IPCC (IPCC, 2013), der erstmals konsistente Methoden zur Berechnung von indirekten Effekten und Rückkopplungen zwischen den Gasen einsetzt. Früher verwendete Werte sind insbesondere für nationale Treibhausgasbilanzen weiterhin von Bedeutung, da sie als Teil der politischen Vereinbarung gelten. Aus diesem Grund verwendet Band 1, Kapitel 2, in dem die Quellen der Treibhausgase sowie ihre Konzentrationen und deren zeitliche Entwicklung beschrieben werden, die nunmehr veralteten Daten aus IPCC (1995).

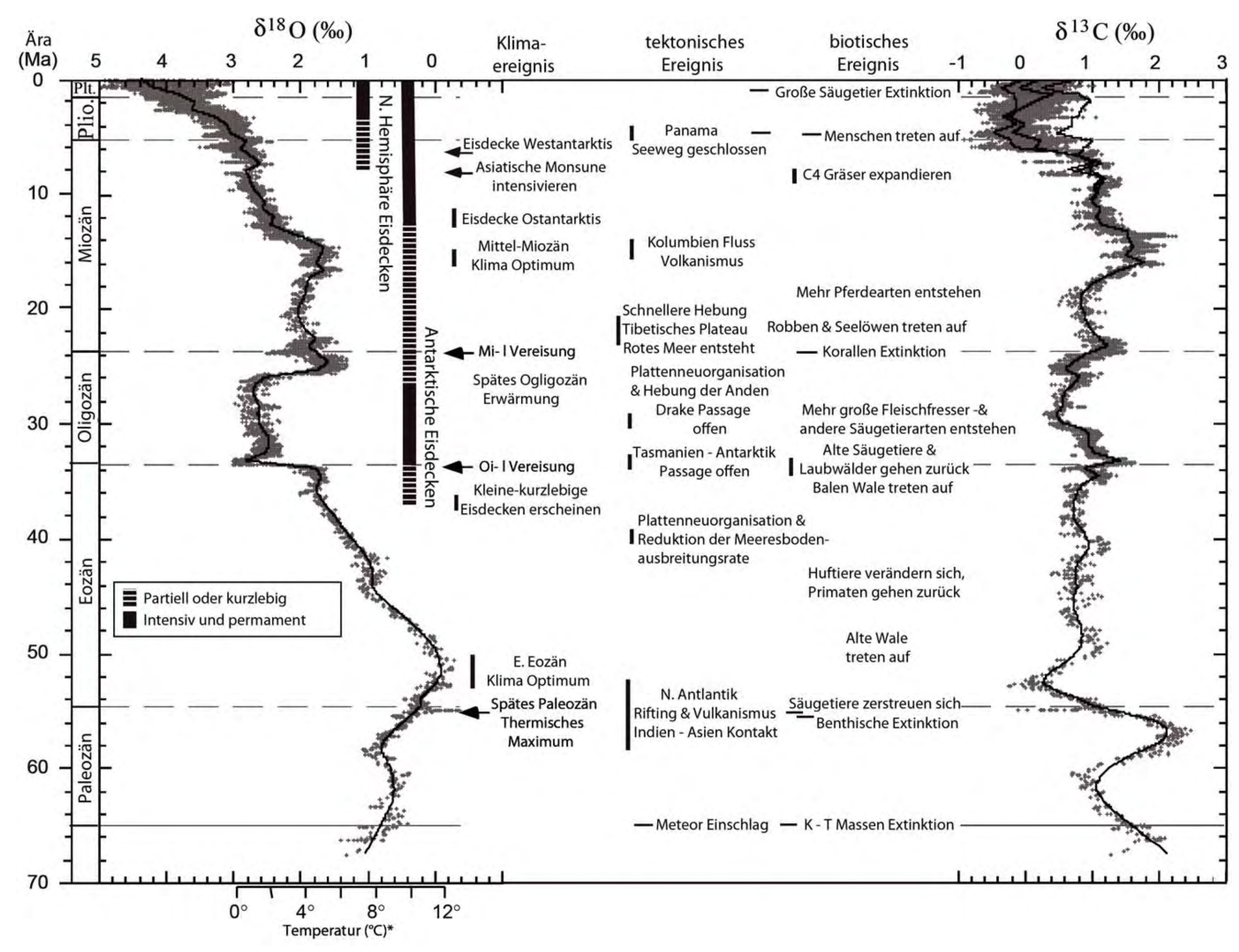
Wie eingangs erwähnt, schätzt der 5. IPCC-Bericht den durch homogen durchmischte Treibhausgase verursachten Treibhauseffekt auf 3,00 [2,22–3,78] W / m², wobei auf Kohlendioxid 1,68 [1,33–2,03] W / m², Methan und seine Sekundärprodukte 0,97 [0,74–1,2] W / m², Sekundärprodukte von halogenierten Kohlenwasserstoffen 0,18 [0,01–0,35] W / m² und Lachgas 0,17 [0,13–0,21] W / m² entfallen (siehe Abbildung 1.4).

1.3 Klimawandel
1.3 Climate change

1.3.1 Natürliche Veränderungen des Klimas

Das globale Klima war über die Jahrmillionen beachtlichen Veränderungen unterworfen, die oft größere Ausmaße hatten als der zurzeit beobachtete Klimawandel. Dies konnte man aus Fossilien oder Ablagerungen aus früheren erdgeschichtlichen Epochen, insbesondere aus Isotopenverhältnissen in Tiefseeablagerungen und Eisbohrkernen rekonstruieren (Zachos et al., 2001). Erdgeschichtlich gesehen herrscht derzeit eine Zwischeneiszeit, wobei das Eiszeitalter (Quartär) erst 2,5 Mio. Jahre alt ist. Insbesondere vor etwa 50 Mio. Jahren war es auf der Erde wesentlich wärmer (um bis zu 12 °C, siehe Abbildung 1.5). Durch die Vereisung des zum Südpol wandernden antarktischen Kontinents trat vor 30 Mio. Jahren eine deutliche Abkühlung ein. Die Bildung nordhemisphärischer Eisschilde, insbesondere in Grönland und Tibet, bedingte eine weitere Abkühlung bzw. eine Anfälligkeit für weitere Vereisungen der nordhemisphärischen Landmassen. Die Schließung der Landbrücke von Mittelamerika und die dadurch stark eingeschränkte Ozeanzirkulation dürfte ebenfalls wesentlich zur Vereisung der nördlichen Polargebiete beigetragen haben. In den letzten 2 Mio. Jahren haben sich längere Eiszeiten, mit globalen Mitteltemperaturen bis zu 6 °C unter heutigen Werten, und kürzere Warmzeiten mit ähnlichen Temperaturen wie heute abgewechselt, wobei Schwankungen der Exzentrizität der Erdbahn um die Sonne und der Neigung der Rotationsachse der Erde den Übergang von Eis- zu Warmzeiten und umgekehrt verursachen oder zumindest zu starken Temperaturschwankungen innerhalb der Eiszeiten und Warmzeiten führen konnten (Klostermann, 2009). Das Klima im Alpenraum während des Eiszeitalters ist detailliert in Band 1, Kapitel 3 beschrieben.

Neben Erdbahnparametern kann die Strahlungsaktivität der Sonne selbst das Klima auf unmittelbare Weise beeinflussen. Einige zyklische Schwankungen wie der 11-jährige Sonnenfleckenzyklus sind gut dokumentiert, doch könnte die interne Dynamik der Sonne auch Schwankungen auf längeren Zeitskalen verursachen, deren Ursache noch kaum bekannt ist. Auch das Spektrum der Sonnenstrahlung ist nicht konstant. So ist die UV-Strahlung während eines Sonnenfleckenmaximums maximal, während die Sonnenflecken im sichtbaren Spektralbereich dunkel erscheinen. Direkte Messungen der Sonnenstrahlung von Satelliten, die auch geringe Schwankungen erfassen können, gibt es erst seit 1978. Davor ist man auf



Quelle: Zachos, J., M Pagani, L Sloan, E Thomas, and K Billups, 2001: Trends, Rhythms, and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present. Science 292, 686–693. [DOI:10.1126/science.1059412] – Figure 2. Nachdruck mit freundlicher Genehmigung der American Association for the Advancement of Science (AAAS)

Abbildung 1.5 $^{18}O/^{16}O$- bzw. $^{13}C/^{12}C$-Isotopenverhältnisse, gewonnen aus Ozeansedimenten in der Tiefsee (Zachos et al., 2001). Schwankungen des $^{18}O/^{16}O$-Isotopenverhältnisses können näherungsweise in Schwankungen der globalen Mitteltemperatur umgerechnet werden; die Skala der Temperaturabweichungen vom derzeitigen globalen Mittelwert ist an der unteren Achse angegeben. Man beachte dabei, dass das Holozän und damit der derzeitige globale Mittelwert bei der gegebenen zeitlichen Auflösung der Kurven praktisch nicht sichtbar ist und es in den vergangenen 2 Mio. Jahren meist viel kälter war als heute (siehe auch AAR14, Band 1, Kapitel 3). Die dicken Balken deuten die Vergletscherung der Antarktis (Beginn vor ca. 35 Mio. Jahren) und der nördlichen Polargebiete (Beginn vor ca. 8 Mio. Jahren) an (strichliert: teilweise, durchgezogen: vollständige Vereisung). In den letzten 2 bis 5 Mio. Jahren (dem sog. Eiszeitalter) hat die Varianz von $^{18}O/^{16}O$ bzw. der Temperatur zugenommen, mit hoher Wahrscheinlichkeit bedingt durch den Eis-Albedo-Feedbackmechanismus. Quelle: Zachos et al. (2001)

Figure 1.5 $^{18}O/^{16}O$ and $^{13}C/^{12}C$ isotope ratios from deep sea sediments (Zachos et al., 2001). Anomalies of $^{18}O/^{16}O$ correspond to anomalies of global mean temperature. The scale of temperature deviation from the global mean of the past century can be found on the lower axis. Please note that the Holocene and thus the current global mean are practically invisible given the time resolution of the curves. Temperatures were lower than today during most of the past 2 million years (see also AAR14, volume 1, chapter 3). Thick bars indicate glaciation of Antarctica (dashed = partial, solid = complete) starting 35 million years ago and of the arctic regions starting 8 million years ago. In the past 2 to 5 million years (ice age) the variance of $^{18}O/^{16}O$ and thus temperature has increased, probably due to ice-albedo feedback mechanisms. Source: Zachos et al. (2001)

Proxydaten wie die Anzahl von Sonnenflecken angewiesen, aus denen man auf die Strahlungsintensität zurück schließt (Haigh, 2011). Trotz der Unsicherheiten kann ausgeschlossen werden, dass Schwankungen der solaren Strahlungsintensität die in den letzten 150 Jahren beobachtete Erwärmung verursacht haben (siehe auch Abschnitt 1.2.3).

Positive Feedback-Mechanismen innerhalb und zwischen den Klimasubsystemen können extern angetriebene Veränderungen wesentlich verstärken, negative können sie abschwächen. Insbesondere führt die positive Rückkoppelung zwischen Eisbedeckung und Albedo zu größeren Klimaschwankungen als man durch primäre Ursachen (z. B. Lage der Erdachse)

erklären kann. Weitere wichtige positive Feedbackmechanismen sind die Koppelung des Wasserdampf-, CO_2- und Methangehalts in der Atmosphäre mit der Temperatur, sowie die Koppelung des Methangehalts mit der Ausdehnung von Feuchtgebieten. Auch gibt es Hinweise, dass in kalten Gebieten gespeichertes CO_2 und Methan (Methanhydrat) eine bereits begonnene Erwärmung weiter verstärken können. Ein derartiger Mechanismus dürfte dafür verantwortlich sein, dass Eiszeiten meist wesentlich abrupter endeten als sie begonnen haben (Zachos et al., 2001). Andererseits zeigen neue Studien (Sistla et al., 2013), dass zumindest die Permafrostböden bei Erwärmung eine geringere CO_2-Quelle sein dürften als bisher angenommen.

Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Ozean sind eine wesentliche Ursache für Klimaschwankungen auf der Zeitskala von Jahren bis Jahrhunderten, etwa El Niño – Southern Oscillation (ENSO), eine unregelmäßig wiederkehrende, starke Anomalie der Meeresoberflächentemperatur im tropischen Pazifik mit einer Amplitude von mehreren °C mit weitreichenden Auswirkungen auf die atmosphärische Zirkulation im pazifischen Raum aber auch im tropischen Atlantik (Philander, 1991; Mayer et al., 2013). Für das europäische Klima hoch relevant ist die atlantische meridionale Tiefenzirkulation (AMOC). Ein wesentlicher Teil davon ist der Nordatlantikstrom, laienhaft oft als „Golfstrom" bezeichnet, der durch den Transport von warmem Wasser aus dem Golf von Mexiko vor die Küsten Europas auch das Klima im Alpenraum beeinflusst, und der sich bei starkem Abschmelzen des Polareises tendenziell abschwächt (Bryden et al., 2005). Damit gekoppelt ist die nordatlantische Oszillation (NAO), die mit Klimaschwankungen in Europa vor allem im Winterhalbjahr in Verbindung steht.

Trotz dieser Vielzahl an möglichen Rückkoppelungsmechanismen schwankt das Klima seit dem Ende der letzten Eiszeit vor ca. 10 000 Jahren nur relativ schwach (Holozän), wobei es in den letzten 1 000 Jahren erwähnenswerte warme Phasen (um 1000) und kalte Phasen (im 17. Jahrhundert und um 1850) gegeben hat (Mann et al., 2008). Insgesamt aber schwankte die nordhemisphärische Temperatur um kaum mehr als ±0.5 °C. Weil vor der Industrialisierung der Einfluss der Menschheit abgesehen von Landnutzungsänderungen unerheblich war, müssen diese Schwankungen primär auf interne Variabilität oder Schwankungen der solaren Einstrahlung zurückzuführen sein. Immerhin konnte die Menschheit ihre technische Infrastruktur in den letzten Jahrhunderten bei relativ geringen Klimaschwankungen entwickeln. Die Infrastruktur ist auf das derzeitige Klima optimiert und dadurch potentiell anfällig auf in der Planung nicht berücksichtigte, aber in Klimaprojektionen vorhergesagte Änderungen der Intensität und Häufigkeit von extremen Wettersituationen. Daraus entstehende Kosten werden in Band 2 ausführlich diskutiert.

Seit ca. 1850 steigt die globale Mitteltemperatur sowohl nach den aus Proxydaten bestimmten als auch nach den aus instrumentellen Daten gewonnenen Zeitreihen an, wobei sich der Anstieg bis in die 1990er Jahre tendenziell beschleunigt hat (Morice et al., 2012). Verglichen mit den früheren Klimaschwankungen des letzten Jahrtausends ist dieser Anstieg sehr rasch (Mann et al., 2008). Aus den vorliegenden Daten und Analysen kann man auch unter Berücksichtigung der natürlichen Variabilität entnehmen, dass der nun beobachtete rasche Anstieg in den letzten 100 Jahren um etwa 0,8 °C erdgeschichtlich nicht extrem, aber zum ersten Mal in der Erdgeschichte vorwiegend durch anthropogene Aktivitäten verursacht ist. Wenn sich die ursächlichen Prozesse für den Anstieg in ähnlicher Weise fortsetzen, ist es nahezu sicher, dass es sich erst um den Beginn einer zu erwartenden noch wesentlich stärkeren Erwärmung handelt (Abschnitt 1.4, Band 1, Kapitel 4; IPCC, 2013). Andererseits wird durch die zu Beginn dieses Abschnitts abgehandelte Abbildung 1.5 und die Proxydaten aus dem letzten Jahrtausend verständlich, dass die Anfälligkeit des Klimasystems für natürliche Schwankungen keineswegs unterschätzt werden darf. Die enge Verzahnung von natürlichen und anthropogenen Antrieben und Rückkoppelungen erschwert eine eindeutige Zuordnung von derzeit beobachteten Klimaänderungen zu anthropogenen Ursachen. Dies ist, wie in den nächsten beiden Abschnitten erklärt wird, nur durch Betrachtung des Kohlenstoffhaushalts und gemeinsamer statistischer Analyse von Beobachtungen und Simulationen des vergangenen Jahrhunderts möglich.

1.3.2 Anthropogene Einflüsse auf das globale Klima

Der Einfluss des Menschen auf das Klimasystem ist im Detail sehr komplex, jedoch erklären einige wenige Aktivitäten den Großteil der beobachteten Klimaänderungen. Dies sind:

- Verbrennung fossiler Brennstoffe (im wesentlichen Kohle, Öl und Gas);
- Landnutzungsänderungen (Abholzung, Aufforstung, Versiegelung) und Landwirtschaft (Abholzung, Versiegelung, Stickstoffdüngung, Methanemissionen aus Reisfeldern und den Mägen von Wiederkäuern);
- Prozessbezogene Emissionen der Industrie (beispielsweise CO_2-Freisetzung bei Zement- und Kalkerzeugung, Stahlerzeugung, Staub und Rußemissionen).

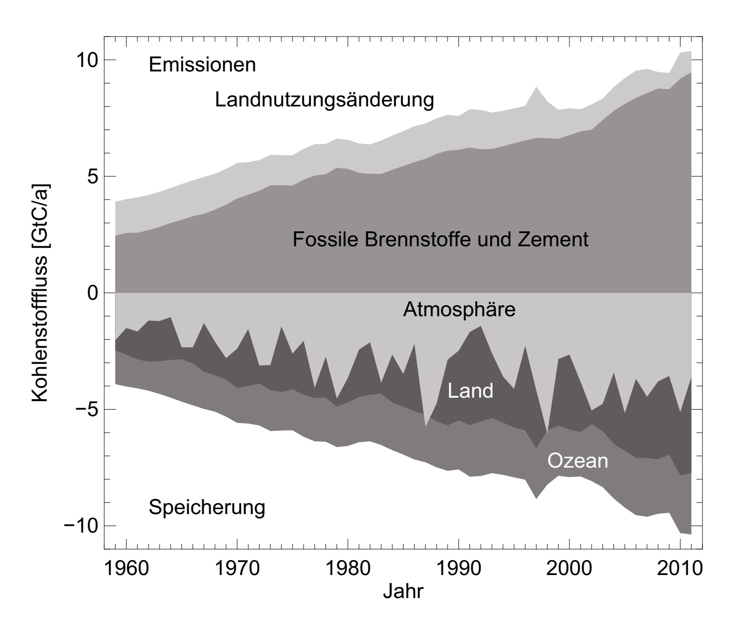


Abbildung 1.6 Zeitreihe der beobachteten anthropogenen globalen CO_2-Emissionen in Gt C / Jahr, sowie deren Speicherung in Atmosphäre, Ozean und Land (Le Quéré et al., 2009, 2013; Peters et al., 2011). Die Unsicherheit (± 1σ) liegt bei <0.2 Gt C / Jahr für fossile Brennstoffemissionen und die Speicherung in der Atmosphäre, bei ca. 0.5 Gt C / Jahr für Landnutzungsänderungen und die Speicherung im Ozean, sowie bei ca. 0.8 Gt C / Jahr für die als Residuum bestimmte Speicherung auf der Landoberfläche. Abbildung erstellt auf Basis von Daten in Le Quéré et al. (2013)

Figure 1.6 Time series of observed global anthropogenic CO_2 emissions in Gt C / a as well as of storage in atmosphere, ocean and land biosphere (Le Quéré et al., 2009, 2013; Peters et al., 2011). Uncertainties (± 1σ) is <0.2 Gt C / a for fossil fuel emissions and atmospheric storage, ca. 0.5 Gt C / a for land use change and storage in the oceans and about 0.8 Gt C / a for storage in the land biosphere, which is calculated as residual. Figure produced on the basis of data published in Le Quéré et al. (2013)

Aktivitäten in diesen drei Bereichen setzen zurzeit (neueste Zahlen aus 2011) etwa 10,4 [8,8–12] Gt C / Jahr frei (Le Quéré, 2009; Le Quéré et al., 2013; Peters et al., 2011). Die entsprechenden Daten für Österreich finden sich in Band 1, Kapitel 2.

Wie Abbildung 1.6 zeigt, hat sich in den letzten 50 Jahren global vor allem die Verbrennung fossiler Brennstoffe mehr als verdreifacht. Mit veränderten CO_2-Konzentrationen in der Atmosphäre und mit fortschreitendem Klimawandel ändern sich jedoch auch die anderen Flüsse. Gleichzeitig mit der Zunahme der Flüsse von CO_2 in die Atmosphäre sind auch die natürlichen CO_2-Senken stärker geworden, wobei sie aber die steigende anthropogene CO_2-Zufuhr nicht ausgleichen können. Nach diesen Abschätzungen beträgt der anthropogene CO_2-Ausstoß derzeit (2011) 9,5 ± 0,5 Gt C / Jahr aus der Verbrennung von fossilen Treibstoffen und Zementproduktion und 0,9 ± 0,6 Gt C / Jahr aus Landnutzungsänderungen, wobei 4,3 ± 0,1 Gt C / Jahr in der Atmosphäre verbleiben, und nur 2,5 ± 0,5 Gt C / Jahr vom Ozean bzw. 2,6 ± 0,8 Gt C / Jahr von der Landbiosphäre aufgenommen werden (die Unsicherheiten sind nach Le Quéré et al., 2013, angegeben und beziehen sich auf eine Standardabweichung). Dementsprechend hat der CO_2-Gehalt in der Atmosphäre seit 1959 um etwa 30 % zugenommen. Sowohl die Daten zu den Emissionen als auch die CO_2-Konzentrationswerte am Mauna Loa (Keeling et al., 1976, siehe Abbildung 5.4 in Band 1, Kapitel 5) und anderen Observatorien sind nur mit relativ geringen Unsicherheiten behaftet. Dies gilt, wegen Verbesserungen bei den Mess- und Analyseverfahren, insbesondere seit 1980. Der CO_2-Fluss in die Ozeane ist bereits wesentlich schwieriger zu messen und die Aufnahme von Kohlenstoff durch die Landbiomasse ist nur indirekt als Residuum aus den anderen Haushaltsgrößen bestimmbar. Die beobachteten Änderungen des Kohlenstoffhaushalts gehören zu den wichtigsten Fundamenten für die Erkenntnis, dass der anthropogene CO_2-Ausstoß zu einer Zunahme der CO_2-Konzentration führt, mit den in Kap. 1.2.3 diskutierten Auswirkungen auf den Strahlungshaushalt.

Seit Beginn der Industrialisierung (1750) wurden durch Verbrennung fossiler Treibstoffe 365 [335–395] Gt C, und durch Landnutzungsänderungen 180 [100–260] Gt C emittiert. Von diesen 545 [460–630] Gt C befinden sich 240 [230–250] Gt C nach wie vor in der Atmosphäre, 150 [60–240] Gt C gingen in den Ozean, wo sie zu einer Erniedrigung des pH-Wertes des Ozeanwassers führen, der Rest wurde von der Landbiosphäre aufgenommen (IPCC, 2013).

Landnutzungsänderungen führen zu erhöhtem CO_2-Ausstoß, weil vielfach in Holz gebundene Biomasse durch Verbrennung oder beschleunigte natürliche Abbauprozesse oxidiert und das resultierende CO_2 freigesetzt wird. Andererseits führen Landnutzungsänderungen zu einer geringfügigen Erhöhung der Bodenalbedo, weil Beton, Wiesen und Weiden sichtbares Licht besser reflektieren als z. B. Wald.

Menschliche Aktivitäten führen auch zu vermehrtem Ausstoß organischer und mineralischer Aerosole. Deren Auswirkungen auf den Klimawandel sind komplex, jedoch haben sie tendenziell kühlenden Einfluss, wie in Abschnitt 1.2.3 erläutert wird und wie es aus Abbildung 1.4 ersichtlich ist. Wegen ihrer geringen Verweildauer in der Luft sind Maßnahmen zur Reduktion von Aerosolen unmittelbarer wirksam als Maßnahmen zur Reduktion von langlebigen Treibhausgasen. Tatsäch-

lich führte in Mitteleuropa die Verbesserung der Luftqualität seit Mitte der 1980er Jahre zu einer bodennahen Erwärmung, weil das kühlende Aerosol vermindert wurde (Wild, 2012).

Detailliertere Information über die klimarelevanten menschlichen Aktivitäten in Österreich sind in Band 1, Kapitel 2 zu finden.

1.3.3 Beobachtung von globalen Klimaänderungen seit 1850

In diesem Abschnitt wird dargestellt, welche Klimaänderungen seit etwa 1850 stattgefunden haben, aber auch wie diese Änderungen gemessen wurden und welche Schwierigkeiten es dabei gibt. Dadurch soll eine tiefere Sicht unseres Wissens zum beobachteten globalen Klimawandel in diesem Zeitraum vermittelt werden.

Wie oben in Abbildung 1.5 dargestellt, kann man das Klima in früheren erdgeschichtlichen Perioden aus sogenannten Proxydaten mit sehr grober räumlicher und zeitlicher Auflösung rekonstruieren. Dazu werden u. a. Fossilien oder Ablagerungen aus früheren erdgeschichtlichen Epochen herangezogen. Insbesondere kann man aus Isotopenverhältnissen in Tiefseeablagerungen und Eisbohrkernen auf die zur Zeit der Ablagerung vorherrschenden Temperaturen und Kohlenstoffdioxidkonzentrationen schließen. Für das Holozän, den Zeitraum nach der letzten Eiszeit, stehen noch weitere Proxydaten, wie Jahresringe in Bäumen, Pollen, oder Korallen, zur Verfügung, um nur einige zu nennen. Bei all diesen Daten kommt allerdings neben der geringen räumlichen Abdeckung auch noch das Problem der Vergleichbarkeit mit instrumentellen Daten dazu. So ist beispielsweise nur schwer auszuschließen, dass Proxydaten, wie der Abstand von Jahresringen in Bäumen, nicht nur von der Temperatur während der Wachstumsperiode, sondern auch von anderen Parametern, wie Niederschlag oder Schädlingsbefall, abhängen. Eine ausführliche Diskussion der Paläodaten im Alpenraum ist in Band 1, Kapitel 3 zu finden.

Nutzbare instrumentelle Klimabeobachtungen begannen im 18. Jahrhundert mit regelmäßigen Pegelablesungen (z. B. Brest seit 1711; Wöppelmann et al., 2008) und Luftdruckmessungen. Systematische Temperaturbeobachtungen begannen in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts (siehe auch Band 1, Kapitel 3). Erst seit Mitte des 19. Jahrhunderts gibt es regelmäßige weltweite Beobachtungen, wenn auch mit zunächst geringer Dichte. Organisationen wie der britischen Marine und einigen vorausschauenden Ländern, darunter Österreich, ist es zu verdanken, dass systematisch Temperatur- und Druckmessungen durchgeführt und ausgebaut wurden. Nach wie vor werden viele dieser Daten aus Archiven gehoben und digitalisiert (Woodruff et al., 2005; Allan et al., 2011). Abgesehen von Einbrüchen während der Weltkriege hat sich das Beobachtungssystem seither stetig weiter verdichtet. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts begann man mit Drachen und Ballonen auch höhere Atmosphärenschichten zu erkunden, seit den späten 1930er Jahren mit Radiosonden. Die Bedeckung mit Radiosondenstationen hat sich nach dem zweiten Weltkrieg, vor allem ab dem internationalen geophysikalischen Jahr 1958, erheblich gebessert.

Der nächste große Schritt zu einem umfassenden globalen Beobachtungssystem waren operationelle Wettersatelliten, die ab 1979 Mikrowellen- und Infrarotstrahlungsdaten in hoher Qualität sowohl über Land als auch über dem zuvor noch immer unzureichend beobachteten Ozean lieferten (Uppala et al., 2005). Spezialisierte Satelliten zur Beobachtung der Meeresoberfläche (Altimeter, Scatterometer) liefern seit Beginn der 1990er Jahre wertvolle Daten über Wind und oberflächliche Meeresströmungen, die von modernen Datenassimilationssystemen für Atmosphäre und Ozean sehr gut genutzt werden können (Dee et al., 2011). Auch die Sonne und der globale Strahlungshaushalt werden von Satelliten aus beobachtet (ERBS, CERES; Kandel, 2012). Ebenso verbesserte sich die Beobachtung von Spurengasen zusehends. Waren es 1979 vor allem Wasserdampf und Ozon, so kam ab den 1990er Jahren eine große Anzahl von Messungen der Konzentration weiterer Spurengase hinzu, z. B. durch den ENVISAT und das MOZAIC Flugzeugmessprogramm (Inness et al., 2013). Davor gab es nur wenige weltweite Messungen von Spurengasen, wobei aber einige absolut zentral für die Beschreibung des Klimawandels sind, wie die bereits erwähnte CO_2-Zeitreihe am Mauna Loa, aber auch Ozonmessungen. Die relative Fülle von Messungen von Spurengaskonzentrationen in Österreich (Band 1, Kapitel 2) darf nicht darüber hinwegtäuschen, dass die globale Abdeckung mit solchen Messungen erst seit wenigen Jahren akzeptabel ist.

Die rasante Entwicklung des globalen Beobachtungssystems, sowohl die Anzahl als auch die Genauigkeit der Beobachtungen betreffend, führt allerdings zu Problemen bei der Vergleichbarkeit von Beobachtungen und Analysen, die einige Jahrzehnte zurückliegen, mit modernen Beobachtungen und Analysen. So konnte mangelnde Abschattung von Thermometern in den Anfangsjahrzehnten vieler Temperaturreihen zu systematischen Messfehlern von einigen Grad C führen. Dieses Inhomogenitätsproblem, auf das in Band 1, Kapitel 3 ausführlich eingegangen wird, ist auf der globalen Skala noch gravierender als im vergleichsweise gut instrumentierten Alpenraum. Die Meeresoberflächentemperatur etwa wurde lange Zeit in Holzkübeln gemessen, die an Bord geholt wurden,

danach auch in Metallkübeln. Später wurde die Temperatur an der Ansaugstelle für die Schiffsmotorenkühlung gemessen, zum Teil in viel größerer Tiefe als früher, wodurch diese Temperaturen im Mittel um bis zu 0,3 °C abweichen (Kennedy et al., 2011a,b; Morice et al., 2012).

Die zeitliche Änderung solcher systematischer Fehler kann zu verfälschten Trends führen. Die Korrektur dieser Fehler ist notwendig, aber im Nachhinein oft schwierig, und sie kann zu Kontroversen zwischen Klimaforschern führen (Thorne et al., 2011). Ein weiterer Effekt, der Messreihen verfälschen kann, ist die Urbanisierung (Verstädterung) der Umgebung von Messstationen. Sie wurde von manchen Wissenschaftlern als Hauptursache für den beobachteten Temperaturanstieg in globalen Messreihen ins Treffen geführt, was aber mittlerweile als widerlegt betrachtet werden kann (Jones et al., 1990; Kalnay und Cai, 2003).

Abbildung 1.7 zeigt die global gemittelte Temperaturanomalie der Erdoberfläche seit 1900, basierend auf homogenisierten und interpolierten Messungen der Temperatur am Boden, von vier Klimadatenzentren berechnet, wobei der Datensatz der University of East Anglia (HadCRUT4, Morice et al., 2012) der bekannteste ist. Die Homogenität der Eingangsdaten wurde aufwändig geprüft und gegebenenfalls wurden die Temperaturreihen homogenisiert. Alle Datensätze zeigen sehr einheitlich einen Anstieg um 0,8 °C seit 1900, wobei sich dieser Anstieg in den letzten Jahrzehnten beschleunigt hat, bevor er in den 2000er Jahren abgeflacht ist.

Die Abflachung des global gemittelten Oberflächentemperaturanstieges in den letzten 12–15 Jahren (im englischen Sprachraum als „warming hiatus" bezeichnet) wird weltweit sehr aufmerksam verfolgt, denn die Oberflächentemperatur ist der wichtigste Indikator von Klimaänderungen. Obwohl unbestritten ist, dass der vorherrschende langfristige Erwärmungstrend aufgrund natürlicher Variabilität durchaus für ein Jahrzehnt oder auch länger unterbrochen werden kann, so ist die gegenwärtige Erwärmungspause doch etwas überraschend, weil keine offensichtliche Ursache (etwa ein starker Vulkanausbruch) zu erkennen ist. Die Erwärmungspause ist im Ostpazifik, der sich im oben genannten Zeitraum merklich abgekühlt hat, am stärksten ausgeprägt (Kosaka and Xie, 2013; Held, 2013), während sie im Alpenraum kaum als solche erkennbar ist (Abbildung 3.9 in Band 1, Kapitel 3). Bemerkenswert ist auch, dass sie von den Simulationen im so genannten CMIP5-Ensemble, der Grundlage für die meisten Klimaprojektionen im jüngsten IPCC-Bericht, kaum erfasst wurde. Nur etwa fünf von über 100 Modellrealisierungen zeigen eine derart ausgeprägte Erwärmungspause, wie sie beobachtet wird. Es ist keineswegs sicher, dass sie schon zu Ende ist (IPCC, 2013). Als wahrscheinlichste Ursachen für die Abflachung werden primär verstärkter Transport von warmem oberflächennahen Ozeanwasser in größere Tiefen (Meehl et al., 2011), sowie auch ein schwaches Sonnenfleckenmaximum (2010–2013 ist das schwächste seit 100 Jahren) und eine Serie kleinerer Vulkanausbrüche angesehen. Diese Faktoren sind in den Klimaprojektionen nicht im beobachteten Ausmaß enthalten. Es kann aber auch nicht ausgeschlossen werden, dass die allgemeine Klimasensitivität der Erde in den Klimamodellen etwas überschätzt wird (Box TS.3 im „Technical Summary" des IPCC-Berichts 2013).

Die Abflachung der Erwärmung ist kein Hinweis auf eine Trendwende. Das globale Temperaturmittel 2003–2012 war um 0,78 °C [mit 90 %iger Sicherheit zwischen 0,72 und 0,85 °C] wärmer als das Mittel 1850–1900 und die wärmste Dekade seit Beginn der instrumentellen Klimabeobachtungen (IPCC, 2013).

Neben dem nun etwas ausführlicher diskutierten Oberflächentemperatursignal ist die speziell in den Tropen starke Erwärmung der Troposphäre bei gleichzeitiger Abkühlung der Stratosphäre, wie sie in Abbildung 1.8 für 2001–2011 zu sehen ist, ein weiterer wichtiger Indikator für die gegenwärtige Klimaänderung. Grund für die Erwärmung ist die vermehrte Absorption langwelliger Strahlung durch den Anstieg von Treibhausgasen. Die Abkühlung der darüber liegenden Stratosphäre hat im Wesentlichen zwei Ursachen: einerseits die Abnahme von stratosphärischem Ozon und andererseits den Anstieg der CO_2-Konzentration. Ozon absorbiert solare UV-Strahlung und heizt dadurch die Stratosphäre. Das Ozon hat in den letzten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts durch die Freisetzung von Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW, englisch: chlorofluorocarbon, CFC) abgenommen. Weniger Ozon in der Stratosphäre bewirkt somit eine Verminderung des Wärmeeintrags aus absorbierter Sonnenstrahlung. Die geringere solare UV-Strahlung aufgrund relativ schwacher Sonnenfleckentätigkeit hat ebenfalls zu einer Abkühlung der Atmosphäre beigetragen („Top-Down"-Mechanismus, siehe Haigh, 1996). Die Verwendung von ozonschädigenden Substanzen wurde mittlerweile stark eingeschränkt und das stratosphärische Ozon erholt sich langsam. Die Nettowirkung von CO_2 in der Stratosphäre ist die Abstrahlung in Richtung Weltraum und folglich eine Abkühlung. Eine Erwärmung der Troposphäre und gleichzeitige Abkühlung der Stratosphäre ist daher ein Indiz dafür, dass Variationen der solaren Strahlung bei der Klimaerwärmung der letzten Zeit bestenfalls eine untergeordnete Rolle spielen.

Das Signal der unterschiedlichen Temperaturtrends in Troposphäre und Stratosphäre versuchte man zunächst erfolglos

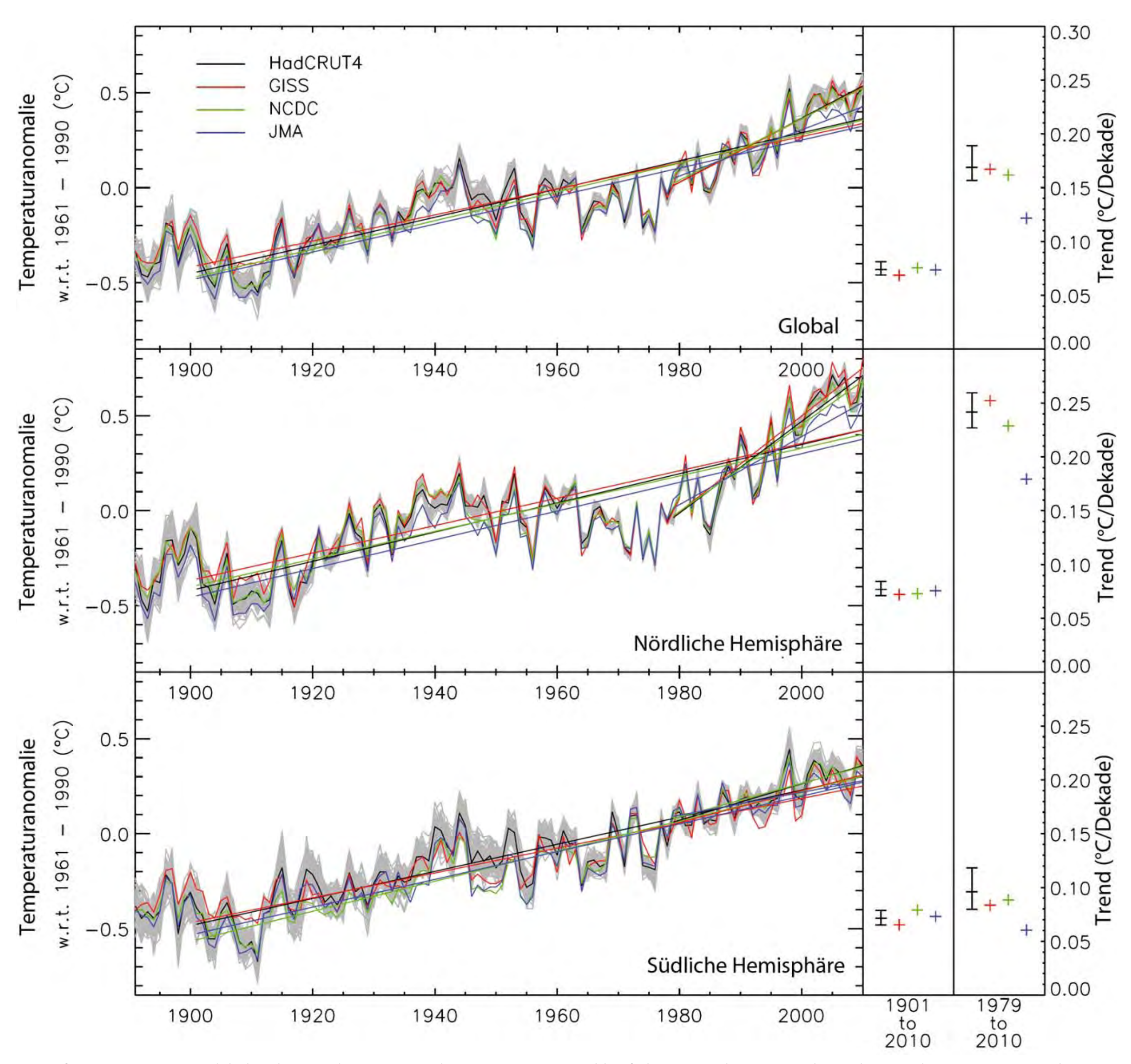


Abbildung 1.7 Zeitreihen der globalen Oberflächentemperaturanomalien (Referenzperiode 1961–1990) mit Unsicherheitsbereich von 1880 bis 2010, global sowie in der Nord- und Südhemisphäre, berechnet durch vier verschiedene Forschungsgruppen aus Großbritannien, USA und Japan. Die Trends (für zwei verschiedene Perioden, als Trendlinien in der Zeitreihengraphik und numerische Werte, teils mit Unsicherheit, in den beiden rechten Spalten) sind in allen Fällen hoch signifikant von Null verschieden. Auf der Nordhemisphäre ist der Anstieg wegen des höheren Landanteils und Feedbackeffekten in den hohen Breiten etwas stärker. Quelle: Morice et al. (2012)

Figure 1.7 Time series of global surface temperature anomalies (reference period 1961–1990) with uncertainty bounds from 1880–2010 globally and for the Northern and Southern Hemisphere, calculated by four different research groups from the UK, USA and Japan. All trends shown (for two different periods, as trend lines in the time series plot and as numerical values, partly with uncertainties, in the two columns to the right) are highly significant with respect to being non-zero. The temperature increase in the Northern Hemisphere is larger due to a larger fraction covered by land and due to feedback effects. Source: Morice et al. (2012)

mit den – seit den 1950er Jahren global zur Verfügung stehenden – Radiosondendaten nachzuweisen. Jedoch waren die gemessenen Temperaturen vor allem zu Beginn wegen des mangelnden Strahlungsschutzes oft um mehrere Grad C zu hoch, wodurch die Temperaturtrends in der Troposphäre aus nicht korrigierten Zeitreihen unterschätzt oder sogar umge-

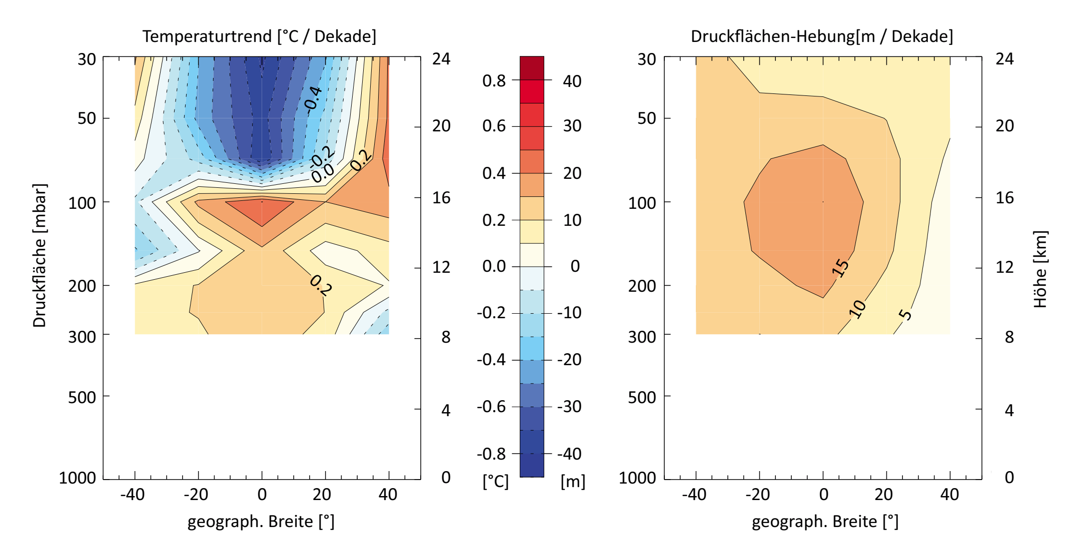


Abbildung 1.8 Temperaturtrends (links) und Hebung von Druckflächen (rechts) oberhalb von 300 hPa (ca. 8 km) seit Mitte der 1990er Jahre in tropischen bis subtropischen Breiten aus Radio-Okkultationsmessungen; negative Trends strichliert. Quelle: nach Lackner et al. (2011)

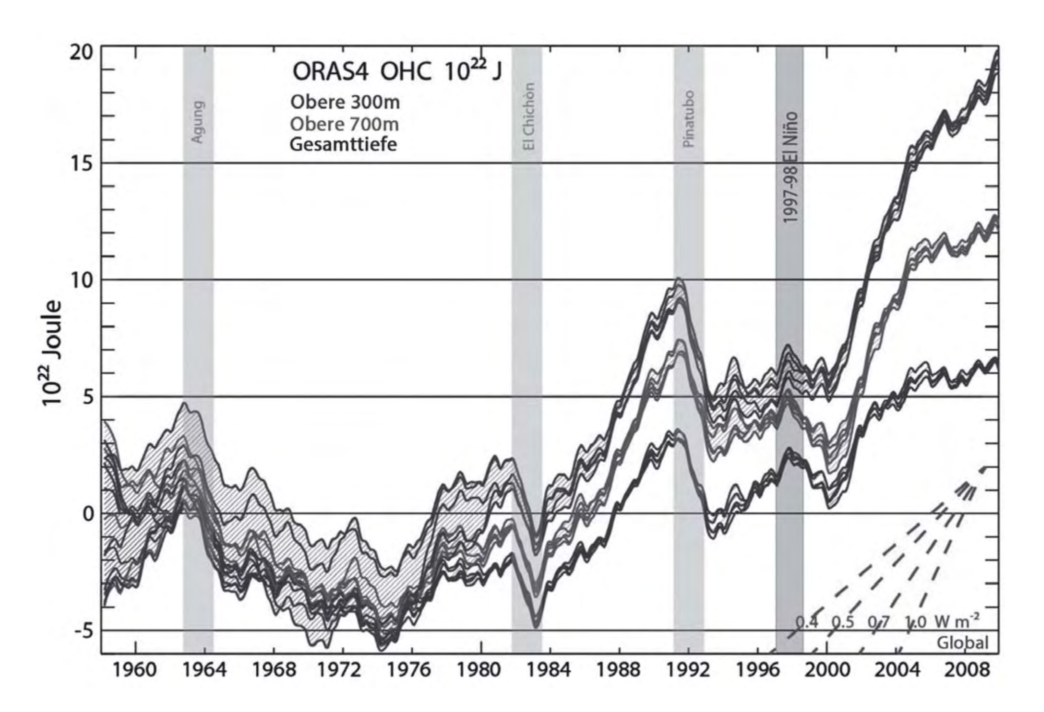
Figure 1.8 Temperature trends (left) and lift of pressure levels (right) above 300 hPa (ca. 8 km) since the mid-1990s in tropical and subtropical regions, calculated from radio occultation measurements; dashed lines indicate negative trends. Source: adapted from Lackner et al. (2011)

kehrt wurden und im Widerspruch zu unabhängigen Messungen aus satellitengestützten Beobachtungssystemen und zu Projektionen der Klimamodelle standen (Santer et al., 2005; Douglass et al., 2007; Santer et al., 2008). Durch eine geeignete Homogenisierung konnten diese Fehler deutlich reduziert werden (Haimberger et al., 2012). In den letzten Jahren wurden beachtliche Fortschritte bei der Reprozessierung und Rekalibrierung sowohl von Radiosondendaten als auch von satellitenbasierten Mikrowellendaten gemacht. Radiosondendaten sind nun in sich konsistenter und auch konsistenter mit Satellitendaten und Klimamodellen (Thorne et al., 2011).

Aufgrund der Erfahrungen mit für die Klimaforschung ohne Nachbearbeitung unzureichenden Beobachtungssystemen wird heute in internationalen Programmen (Global Climate Observing System [GCOS], Global Ocean Observing System [GOOS], Global Atmospheric Watch [GAW]) besonders auf die Langzeitstabilität (Qualitätssicherung durch dokumentierte, regelmäßige Eichungen, die auf Primärstandards und Eichnormale zurück geführt werden können; Absolutkalibrierung) sowohl von in situ als auch satellitenbasierten Messsystemen geachtet sowie darauf, dass etablierte Messsysteme langfristig aufrechterhalten bleiben (Karl et al., 2003).

Neben einzelnen Stationsreihen wie der oben erwähnten CO_2-Zeitreihe erfüllen die seit 2001 operationell verfügbaren Radio-Okkultationsdaten (Anthes, 2011) diese hohen Ansprüche. Diese Messungen basieren auf Radiosignalen von GPS (Global Positioning System)-Satelliten, die von weiteren Satelliten in niedriger Umlaufbahn empfangen werden. Beim Durchqueren der Atmosphäre werden die Radiowellen gebrochen und verlangsamt. Aus der gemessenen Signalveränderung werden vertikale Profile atmosphärischer Variablen, wie Refraktivität (Brechungsindex der Luft), Dichte, Druck und Temperatur, berechnet. Diese GPS-Radio-Okkultationsmethode liefert selbstkalibrierte, langzeitstabile Messwerte, wobei die Daten unterschiedlicher Satelliten im globalen Mittel in Höhen zwischen 10 und 30 km auf wenige Hundertstel Grad übereinstimmen (Foelsche et al., 2011). Damit ist es möglich, Radio-Okkultationsdaten verschiedener Satelliten zu einem konsistenten Datensatz zu kombinieren, der sich gut zur Untersuchung der Klimavariabilität der Atmosphäre und der Klimaänderung eignet (Scherllin-Pirscher et al., 2012; Steiner et al., 2011).

Aufgrund der hohen Qualität der Radio-Okkultationsdaten (Ho et al., 2012; Scherllin-Pirscher et al., 2011; Steiner et al., 2013) können damit auch schon im vergleichsweise kurzen Zeitraum von ca. 10 Jahren Temperaturtrends in der Atmosphäre nachgewiesen werden (Steiner et al., 2009). Man findet eine Erwärmung der Troposphäre und Abkühlung der unteren Stratosphäre, welche am stärksten in den Tropen ist (Abbildung 1.8, Lackner et al., 2011). Sehr ähnliche Temperaturverläufe findet man in modernen Radiosondendaten (Ladstädter et al., 2011). Die Erwärmung bewirkt auch eine Ausdehnung der Luft und somit eine Anhebung der Druckflächen in der oberen Troposphäre (Abbildung 1.8).



Distinctive climate signals in reanalysis of global ocean heat content / Balmaseda M. A. et al. / Geophysical Research Letters 40/9. © 2013 American Geophysical Union. All Rights Reserved. http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/grl.50382/abstract

Abbildung 1.9 Energiegehalt (OHC = Oceanic Heat Content) in den obersten 300 m, in den obersten 700 m bzw. in den obersten 2 000 m der Ozeane, berechnet aus Analysen des ECMWF-Ozean-Re-Analysesystems 4 (ORAS4) (nach Balmaseda et al., 2013b). Die stärkste Zunahme gibt es im Integral über die Gesamttiefe (oberste Kurvenschar). Die Kurvenscharen sind Ergebnisse einzelner Realisierungen, wobei der Unsicherheitsbereich für die einzelnen Kurvenscharen auch noch schattiert ist. Neben der Abschätzung aus ORAS4 gibt es noch mindestens zehn andere Abschätzungen des ozeanischen Energiegehaltes, die ein recht einheitliches Bild zeigen (Loeb et al., 2012; Levitus et al., 2012). Die OHC-Erhöhung in 40 Jahren um 24×10^{22} J kann in eine durchschnittliche Erwärmung der obersten 2 000 m des Ozeans um circa 0,09 °C umgerechnet werden. In den letzten 10 Jahren der Zeitreihe hat sich die Genauigkeit der Messungen durch Verwendung der ARGO-FLOATs wesentlich erhöht, wie an den schmäleren Unsicherheitsbereichen abzulesen ist. Im Bild rechts unten ist angedeutet, welcher Energieeintrag durch die Ozeanoberfläche notwendig ist, um die festgestellte Zunahme des OHC zu erreichen. Quelle: nach Balmaseda et al. (2013)

Figure 1.9 Oceanic heat content (OHC) of the upper 300 m, the upper 700 m and the upper 2 000 m, calculated from analyses of the ECMWF Ocean Reanalysis System 4 (ORAS4) (Balmaseda et al., 2013). The strongest increase occurs in the integral over the total ocean depth (uppermost set of curves). The sets of curves are results of several ORAS realizations, the uncertainty bounds for the different sets are shaded. There are at least 10 other assessments of OHC, which show a fairly coherent picture (Loeb et al., 2012; Levitus et al., 2012). The increase of 24×10^{22} J can be converted into an average warming of the upper 2 000 m of the oceans by about 0.09 °C. The accuracy of the last 10 years is much higher due the advent of ARGO-FLOATs, which can be seen from the much smaller uncertainty regions. The dashed lines in the lower right corner indicate how much absorption of energy at the surface is necessary to achieve the observed OHC increase. Source: adapted from Balmaseda et al. (2013)

Ebenso bedeutsam wie der Temperaturanstieg an der Erdoberfläche ist jener in den Ozeanen. Während es sich an der Erdoberfläche zumindest über Land um eine Gleichgewichtstemperatur handelt, weil kaum Energie gespeichert wird, sind die Ozeane nicht im Gleichgewicht, sondern nehmen große Energiemengen auf, wodurch sie sich langsam erwärmen. Die Erwärmung ist nur in den letzten 40 Jahren nachweisbar, weil davor nur wenige Temperaturmessungen im tiefen Ozean mit der nötigen Präzision (1 / 100 °C) durchgeführt wurden. Auch für die Ozeane gibt es mittlerweile mehrere Analysen des Zustandes der letzten 50 Jahre bis in Tiefen von 2 000 m. Ab ca. 1970 ist die Datenbedeckung in großen Tiefen durch so genannte „Expandable Bathy-Thermographs" (XBTs) und ab ca. 2000 durch Tauchbojen (sog. ARGO FLOATS) für Reanalysen der Tiefseezirkulation ausreichend (Levitus et al., 2012). Die Ozean-Reanalysen erlauben eine Bestimmung der Zunahme des Energiegehalts im Ozean (Oceanic Heat Content, OHC) – eine zentrale Größe in der Klimaforschung, denn durch sie kann nachgewiesen werden, dass der durch den zusätzlichen Treibhauseffekt bedingte Nettostrahlungsfluss ins Klimasystem vor allem zur Erwärmung der Ozeane führt (Loeb et al., 2012). Nach neuesten Erkenntnissen ist es sogar so (Meehl et al., 2011; Balmaseda et al., 2013b), dass Perioden mit geringer globaler Erwärmung an der Erdoberfläche (wie 2000–2009) zugleich Zeiten mit verstärkter Aufnahme von Wärme im tiefen Ozean sind (Abbildung 1.9). Der Anstieg ist konsistent mit einem Energiefluss von etwa 0,9 W / m², wie er auch in Abbildung 1.2 angegeben ist. Im 5. IPCC-Bericht wird der starke Transport von Energie in tiefe Ozeanschichten als wichtiges Argument zur Erklärung der seit etwa einem

Jahrzehnt stagnierenden Erwärmung an der Erdoberfläche angeführt. Möglicherweise kann der Ozean die Oberflächentemperaturzunahme aufgrund der Zunahme der Treibhausgase stärker dämpfen als bisher angenommen.

An Abbildung 1.9 ist auch bemerkenswert, dass die Ozeane nach Vulkanausbrüchen für einige Jahre sehr viel Energie aus den obersten 300 m an die Atmosphäre abgeben. Die Ozeane dämpfen so den kühlenden Effekt von Vulkanausbrüchen erheblich. Selbst starke ENSO-Ereignisse wie jenes von 1997/1998 haben hingegen einen vergleichsweise geringen Einfluss auf den Wärmegehalt der Ozeane, vielmehr bewirken sie eher eine Umverteilung der Energie innerhalb der Tropen (Mayer et al., 2013).

Auch vom Meereis und vom Inlandeis gibt es mittlerweile Analysen der Eismasse und der Eisflüsse auf einem Gitter (Huybrechts und Miller, 2005). Derartige Analysen erlauben es, die weltweit deutlich sichtbaren Änderungen in der Kryosphäre quantitativ zu dokumentieren. Diese Veränderungen sind einerseits der Rückgang der Gletscher in den Alpen (siehe Band 1, Kapitel 3) und anderen Gebirgen (z. B. Prinz et al., 2011), aber vor allem auch das Zurückweichen des grönländischen Inlandeises und die Verringerung des Meereises in Bezug auf Ausdehnung und Dicke im arktischen Sommer (Stroeve et al., 2012). Zusammen mit der thermischen Ausdehnung der Ozeane bewirkt das Abschmelzen von Gletschern und Eisschilden einen beschleunigten Anstieg der Meeresoberfläche und damit eine zunehmende Gefährdung der Küstengebiete. Von 1880 bis 2009 ist der Meeresspiegel im globalen Mittel um 21 cm angestiegen (Church und White, 2011), was durch die seit mehreren Jahrhunderten durchgeführten Pegelmessungen in Häfen sowie durch satellitengestützte Beobachtungssysteme (Altimeter) bestens belegbar ist. Angemerkt sei, dass das Meereis keine direkte Auswirkung auf den Meeresspiegel hat, da es auf dem Wasser schwimmt. Durch den großen Albedo-Unterschied zwischen Eis und Wasser ist es jedoch ein wichtiger Parameter im Klimasystem.

Der Klimawandel äußert sich auch in der Änderung einer Reihe anderer Parameter wie der Niederschlagsverteilung oder der Verschiebung der Klima- und Vegetationszonen (Kottek et al., 2006; Rubel und Kottek, 2010, siehe auch Abschnitt 1.5). Eine detaillierte Beschreibung der geänderten globalen Niederschlagsverteilung würde hier den Rahmen sprengen, es wird daher auf Abschnitt 1.5 sowie insbesondere auf den 5. IPCC-Bericht (IPCC, 2013) verwiesen. Die Änderung der Niederschlagsverteilung in Europa und im Alpenraum wird in Band 1, Kapitel 3 beschrieben.

1.3.4 Zuordnung beobachteter Klimaänderungen (anthropogen oder natürlich)

Die starken natürlichen Klimaschwankungen, die für die Vergangenheit beobachtet werden können, erschweren den Nachweis, dass die derzeitige Klimaänderung überwiegend anthropogene Ursachen hat. Dafür muss herausgefunden werden, welche Parameter des Klimasystems durch den Menschen direkt beeinflusst werden und wie das Klimasystem als dynamisches System darauf reagiert. Wie oben beschrieben, erfolgt der direkte Einfluss hauptsächlich durch Emission von Spurengasen, die lange in der Atmosphäre gespeichert werden. Die Erhöhung der Konzentration dieser Spurengase in den letzten Jahrzehnten ist, wie in Abschnitt 1.3.2 diskutiert, zweifelsfrei nachweisbar und kann auf anthropogene Quellen zurückgeführt werden. Es sind dies vor allem Emissionen von CO_2, CH_4 und CFCs. An zweiter Stelle sind es Landnutzungsänderungen (Abholzung, Überweidung, Versiegelung), die z. B. den lokalen Tagesgang der Temperatur unmittelbar beeinflussen.

Die Untersuchung der Auswirkungen der anthropogenen Emissionen und Landnutzungsänderungen auf Parameter wie die globale Temperatur- oder Niederschlagsverteilung aber auch die chemische Zusammensetzung der Ozeane erfordert aufwändige Computermodelle des Klimasystems, die Transporte von Spurenstoffen und Wechselwirkungen zwischen den Subsystemen realistisch beschreiben können. Solche Computermodelle werden im vorliegenden Band in Abschnitt 1.4 bzw. Kapitel 4 beschrieben.

Klimamodelle liefern vierdimensionale (die horizontale und vertikale sowie zeitliche Verteilung enthaltende) Simulationen mit vollständiger globaler Abdeckung auf einem regelmäßigem Gitter. Beobachtungen sind dagegen oft sehr unregelmäßig verteilt und ein Beobachtungssystem liefert meist nur Information über einen Aspekt des Klimasystems, was einen direkten Vergleich mit Klimamodellergebnissen erschwert. Seit den frühen 1990er Jahren werden deshalb die globalen Beobachtungsdaten mit Hilfe numerischer Modelle mit einheitlichen Analyseverfahren verarbeitet (Fachterminus: „assimiliert“), um globale Analysen in einem einheitlichen Format auf einem regelmäßigen räumlichen Gitter und mit größtmöglicher zeitlicher und räumlicher Homogenität zu erhalten. Diese vierdimensionalen globalen Datensätze kombinieren in statistisch optimaler Weise die Informationen verschiedenster Beobachtungssysteme (Bodenbeobachtungen, Radiosonden- und Flugzeugbeobachtungen, Radianzen aus Satellitenbeobachtungen) und erleichtern wesentlich den Vergleich mit Klimamodellen (Santer et al., 2004). Die derzeit besten atmosphärischen Reanalysen umfassen den Zeitraum

Tabelle 1.1 Die wichtigsten im „Special Report on Emission Scenarios" (Nakicenovic und Swart, 2000) angeführten Entwicklungsszenarien, die Grundlage für die meisten Klimaprojektionen im 3. und 4. IPCC-Sachstandsbericht (Houghton et al., 2001) waren

Table 1.1 The most important emission scenarios mentioned in the „Special Report on Emission Scenarios" (Nakicenovic and Swart, 2000) which were the base of most of the climate projections in the 3rd and 4th IPCC Assessment Reports

Szenario	Beschreibung	Berechnete Erwärmung von 2000 bis 2100
A1B	Rasches Wirtschaftswachstum, ausgeprägte Globalisierung, Bevölkerung erreicht 9 Mrd., nimmt dann ab, rasche Ausbreitung technologischer Entwicklungen	1,7–4,4 K
A2	Unabhängige Nationen, wenig Wechselwirkung, stetig zunehmende Weltbevölkerung, Regionalisierung	2,0–5,4 K
B1	Wie A1, jedoch umweltfreundlicher, Entwicklung in eine Dienstleistungs- und IT-Gesellschaft, nachhaltige Entwicklung	1,1–2,9 K
B2	Wie A2, mit langsamerem Bevölkerungswachstum, umweltfreundlicher, technologischer Fortschritt eher regional	1,4–3,8 K

von 1979 bis 2012 und wurden vom Europäischen Zentrum für mittelfristige Wettervorhersagen (ECMWF) (Dee et al., 2011), dem japanischen Wetterdienst (Ebita et al., 2011) und von der US-amerikanischen Weltraumbehörde NASA (Rienecker et al., 2012) erstellt. Nicht unerwähnt bleiben darf auch die „20th Century Reanalysis" des US-amerikanischen Wetterdienstes (NOAA), die basierend auf Temperatur- und Druckdaten von 1872 bis 2010 dreidimensionale globale Felder des atmosphärischen Zustands berechnete und in Abständen von 6 h verfügbar machte (Compo et al., 2011). Reanalysen der globalen Ozeanbeobachtungen haben ebenfalls große Fortschritte gemacht und liefern, wie schon weiter oben erwähnt, wertvolle Aufschlüsse über die globale Verteilung der Erwärmung der Ozeane (Balmaseda et al., 2013b). Auch erste Reanalysen von Spurenstoffkonzentrationen sind bereits verfügbar (GEMS, 2012) und werden laufend erweitert und verbessert (z. B. Projekt MACC, Inness et al., 2013).

Um feststellen zu können, ob eine Klimaänderung natürlichen oder anthropogenen Ursprungs ist, führt man Simulationen des Klimas der letzten ca. 150 Jahre durch, wobei man anthropogene Einflüsse in den Simulationen einmal mitberücksichtigt und einmal nicht. Die Unterschiede in den simulierten Klimazuständen haben ein dreidimensionales Muster, z. B. der Temperatur, das man als Fingerabdruck des anthropogenen Einflusses auf das globale Klima bezeichnet. Nun prüft man, ob sich dieser Fingerabdruck auch in den Klimabeobachtungen oder in globalen Reanalysen nachweisen lässt. Sollte dies unter Einbeziehung aller Unsicherheiten in Klimabeobachtungen und -simulationen der Fall sein, kann man statistisch abgesichert aussagen, dass die beobachteten Klimaänderungen ohne Berücksichtigung des menschlichen Einflusses nicht erklärbar sind (Hasselmann, 1993; Hegerl et al., 1996; Hegerl et al., 2006; Hegerl und Zwiers, 2011). Die Details der Methodik sind komplex aber gut etabliert und es kann mit ihr eindeutig nachgewiesen werden, dass die beobachteten Temperaturänderungen der letzten 150 Jahre nur unter Berücksichtigung menschlicher Aktivitäten erklärbar sind. Für räumlich und zeitlich variablere Parameter wie den Niederschlag ist neuesten Studien zufolge der anthropogene Einfluss mittlerweile ebenfalls nachweisbar (Min et al., 2011).

Umgekehrt kann man zeigen, dass die natürliche Variabilität des Klimas ausreicht, um kurzfristige Schwankungen, wie die geringere globalen Erwärmung der Erdoberfläche seit 1998, zu erklären (Meehl et al., 2011; Kosaka und Xie, 2013).

1.3.5 Szenarien der zukünftigen klimarelevanten menschlichen Aktivitäten im 21. Jahrhundert

Nachdem der Nachweis für den anthropogenen Einfluss auf das derzeitige Klima erbracht wurde, ist klar, dass auch die zukünftige Klimaentwicklung maßgeblich von den weltweiten sozioökonomischen Entwicklungen beeinflusst werden wird. Dabei sind sehr verschiedene Entwicklungspfade denkbar, die von schwer vorhersagbaren Parametern wie Bevölkerungsentwicklung, Wirtschaftsentwicklung, Einsatz und Entwicklung von emissionsmindernden Technologien, Rohstoffverfügbarkeit und politischen Handlungen abhängen. Damit unterliegt sie auch den Auswirkungen menschlicher Entscheidungen, die grundsätzlich nicht mit dynamischen Modellen vorhersagbar sind. Um dennoch Aussagen für die Zukunft und insbesondere über die Bandbreite künftiger Emissionen machen zu können, werden so genannte Szenarien entworfen, mögliche Entwicklungspfade der menschlichen Gesellschaft. Für diese Pfade (in der neuesten englischsprachigen Literatur wird der

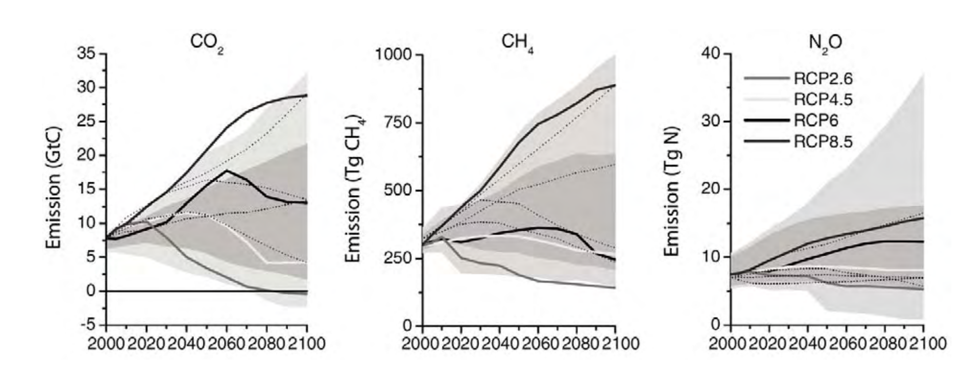
Tabelle 1.2 Die vier repräsentativen Konzentrationspfade. Akronyme: MESSAGE, Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact, International Institute for Applied Systems Analysis, Austria; AIM, Asia-Pacific Integrated Model, National Institute for Environmental Studies, Japan; GCAM, Global Change Assessment Model, Pacific Northwest National Laboratory, USA; IMAGE, Integrated Model to Assess the Global Environment, Netherlands Environmental Assessment Agency

Table 1.2 The four representative concentration pathways. Acronyms: MESSAGE, Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact, International Institute for Applied Systems Analysis, Austria; AIM, Asia-Pacific Integrated Model, National Institute for Environmental Studies, Japan; GCAM, Global Change Assessment Model, Pacific Northwest National Laboratory, USA; IMAGE, Integrated Model to Assess the Global Environment, Netherlands Environmental Assessment Agency

Name	Strahlungsantrieb	Spurengas-Konzentration im Jahr 2100	Pfad	Modell zur Berechnung des RCP
RCP8.5	8,5 W/m² im Jahr 2100	1 370 ppm CO_2-Äq.	Ansteigend	MESSAGE
RCP6.0	6,0 W/m² im Jahr 2100, danach stabil	850 ppm CO_2-Äq.	Stabilisierend	AIM
RCP4.5	4,5 W/m² im Jahr 2100, danach stabil	650 ppm CO_2-Äq.	Stabilisierend	GCAM
RCP2.6 oder RCP3PD	3,0 W/m² vor 2100, dann Abnahme auf 2.6 W/m² bis 2100	490 ppm CO_2-Äq.	Erst ansteigend, dann Abnahme	IMAGE

Ausdruck „story lines" verwendet) werden unter Verwendung sozioökonomischer Modelle die Treibhausgasemissionen und andere relevante Parameter als Funktion der Zeit abgeschätzt. Diese dienen als Input für die Klimasimulationen. Im 4. IPCC-Sachstandsbericht waren es Emissionsszenarien, die im „Special Report on Emission Scenarios" (SRES; Nakicenovic und Swart, 2000) publiziert wurden. Dabei wurden insbesondere die Emissionen von klimawirksamen Gasen festgeschrieben. Allerdings wurden Landnutzungsänderungen und mögliche politische Maßnahmen nicht berücksichtigt. Die bekanntesten SRES-Szenarien sind die sog. Markerszenarien A1B, A2, B1 und B2. Obwohl mittlerweile überholt, werden ihre wichtigsten Eigenschaften in Tabelle 1.1 kurz aufgeführt, weil die Ergebnisse in Band 1, Kapitel 4 und auch in Band 2 und Band 3 weitgehend darauf basieren und wiederholt darauf Bezug nehmen. Detaillierte Informationen finden sich auch in Band 3, Kapitel 1.

Für den neuen, 5. IPCC-Sachstandsbericht wurden vier so genannte „Representative Concentration Pathways" (RCP, „repräsentative Konzentrationspfade") entwickelt, welche die Grundlage für die Mehrzahl der im 5. Sachstandsbericht erstellten Klimaprojektionen bilden. In den einzelnen Pfaden werden unterschiedliche Verläufe der Emissionen vorgegeben, die im Jahr 2100 zu Werten des Strahlungsantriebs in einem



Abdruck mit freundlicher Genehmigung von Springer Science+Business Media: Climatic Change, The representative concentration pathways: an overview, 109, 2011, S. 21, van Vuuren et al., Abb. 6

Abbildung 1.10 Entwicklung der Emissionen der wichtigsten Treibhausgasen in den RCPs. Die Bereiche zwischen dem 5. und dem 95. Perzentil sind dunkelgrau und jene zwischen dem 1. und dem 99. Perzentil sind grau schattiert. Die punktierten Linien deuten die vier wichtigsten SRES-Szenarios (vgl. Tabelle 1.1) an. Man beachte die negativen CO_2-Emissionen in der Spätphase des RCP2.6. Der RCP2.6 wird in der Literatur auch als RCP3PD (3PD für „3.0 W/m² peak, then decline") bezeichnet. Quelle: van Vuuren et al. (2011)

Figure 1.10 Projected evolution of emissions of the main greenhouse gases in 4 RCPs. Regions within the 90th (5–95 %) and 98th (1–99 %) percentiles are shaded dark and light grey, respectively. The dotted lines indicate the evolution of 4 of the older SRES marker scenarios (Table 1.1). Note the negative net CO_2 emissions in RCP2.6 in the late 21st century. RCP2.6 is also termed RCP3PD (3PD for „3 W/m² Peak, then Decline"). Source: van Vuuren et al. (2011)

Bereich von 2,6–8,5 W/m² führen (Moss et al., 2010; van Vuuren et al., 2011). Dieser Streubereich umfasst die bisher verwendeten SRES-Szenarien. Die Namen der Pfade, ihre Ersteller und die wichtigsten Kennzahlen sind in Tabelle 1.2 zusammengefasst.

Die neuen Szenarien berücksichtigen auch Landnutzungsänderungen und Klimapolitikänderungen. Die Szenarien mit geringem Strahlungsantrieb nehmen an, dass die Netto-CO_2-Emissionen u. a. durch neue großtechnische Verfahren zur Entnahme von CO_2 aus der Atmosphäre (Carbon Dioxide Removal – CDR, siehe unten) erheblich reduziert werden können. Abbildung 1.10 zeigt die Bandbreite der Emissionen der wichtigsten Treibhausgase bis 2100. Sie ist bei CO_2 und Methan wesentlich höher als jene der vier SRES-Markerszenarien (in der Abbildung schwarz punktiert).

Häufig werden primär die Ergebnisse der mittleren Szenarien dargestellt oder mit regionalen Klimasimulationen weiter verarbeitet. Es ist aber wichtig, sich vor Augen zu halten, dass diese nur einen Teil des möglichen Spektrums darstellen. Insbesondere im Hinblick auf Minderungsmaßnahmen (Band 3) ist es wichtig, den Unterschied zwischen hohen und niedrigen Szenarien und damit den möglichen Effekt von entsprechenden Anstrengungen zur Emissionsminderung zu betrachten.

Der geringe CO_2-Ausstoß im RCP3PD-Szenario basiert auf der Annahme, dass vor allem in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts große Teile des in Kraftwerken und Industrieanlagen entstehenden CO_2 unmittelbar nach der Verbrennung, wo es in hoher Konzentration auftritt, abgetrennt und in geologischen Formationen, wie beispielsweise in alten Erdöllagerstätten oder in salzhaltigen, tief gelegenen Grundwasserkörpern, gespeichert wird. Dieses als „Carbon Capture and Storage“ (CCS) bezeichnete Verfahren wird vielfach kritisch gesehen (Schellnhuber, 2011). Immerhin könnte aber durch CCS, angewendet bei der Verbrennung biogener Treibstoffe, sogar aktiv Kohlenstoff aus der Atmosphäre entfernt werden („Carbon Dioxide Removal“, CDR), was für die Realisierung des RCP3PD notwendig wäre. Allerdings verbraucht die Gewinnung biogener Treibstoffe in global relevanten Mengen viel Anbaufläche und konkurriert mit der Lebensmittelerzeugung. Das Ausmaß der Anwendbarkeit dieses Verfahrens ist derzeit schwer abschätzbar (Link et al., 2013; IPCC, 2013), weshalb die RCPs in diesem Punkt eine besonders große Spannweite aufweisen (RCP3PD: 85 % Anteil von CCS an der fossilen Energieaufbringung, praktisch kein CCS in RCP8.5, siehe Abbildung 1.11).

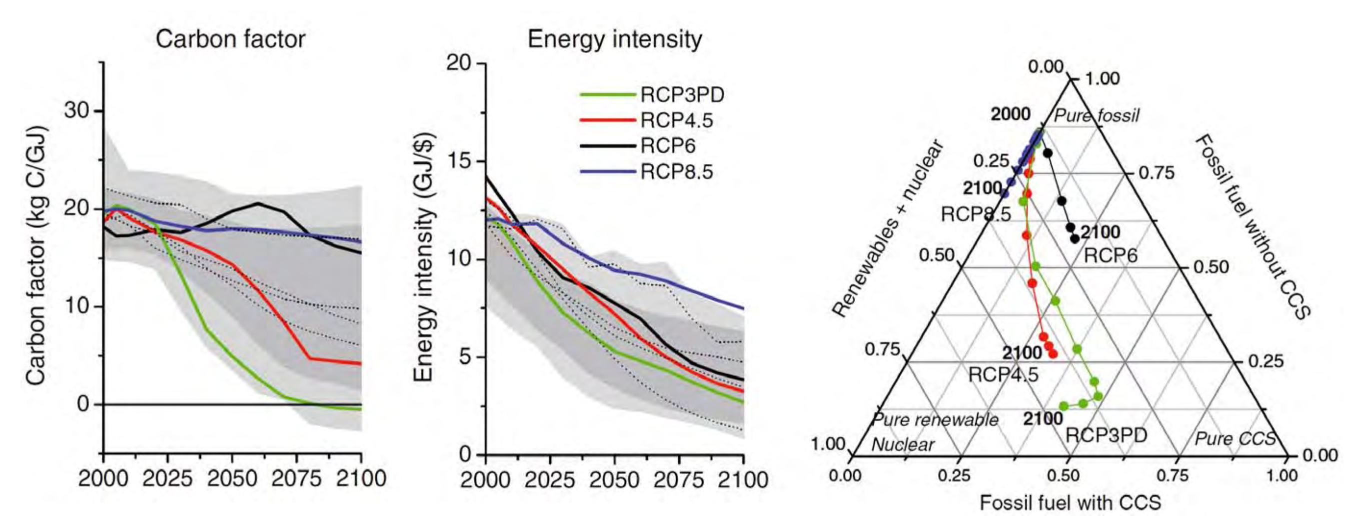
Im Detail wird im RCP3PD angenommen (Abbildung 1.11), dass bis zum Jahr 2080 50 % der Energieerzeugung durch Verbrennung fossiler Brennstoffe mit CCS und nur 15 % durch Verbrennung ohne CCS erfolgt, wobei der Rest durch erneuerbare Energieträger oder nukleare Energieerzeugung (zusammen etwa 35 %) gedeckt wird. Der Kohlenstoffausstoß pro Gigajoule Primärenergieeinsatz („Kohlenstofffaktor“) würde sich wesentlich verringern. Die Verringerung der Energieintensität der Wirtschaft ist ein weiterer tragender Faktor für die Verringerung der künftigen CO_2-Emissionen in solchen Szenarien. Ob die notwendigen technischen und wirtschaftlichen Voraussetzungen dafür eintreten werden, ist derzeit nicht absehbar und stark von politischen Entscheidungen abhängig.

Neben dem CDR wird auch „Solar Radiation Management“ (SRM) als Form des „Geo-Engineerings“ diskutiert (z. B. Link et al., 2013), mit der das Klimasystem verändert werden könnte. SRM beinhaltet unter anderem das Einbringen von Aerosolen (insbesondere Schwefelsäureaerosol) in die Stratosphäre, wodurch Sonnenstrahlung vermehrt zurück gestreut wird. Allerdings müssten beim SRM die eingebrachten Aerosole ständig erneuert werden, und das Problem der Versauerung der Ozeane würde nicht gelöst werden, weil die CO_2-Konzentration nicht reduziert würde. Auch andere, unbeabsichtigte Wirkungen auf das Klimasystem sind möglich.

Generell zeigt sich (Abschnitt 1.5 und Band 1, Kapitel 4), dass die Bandbreite der RCPs den größten Unsicherheitsfaktor der längerfristigen Klimaprojektionen darstellt. Unsicherheiten in der Abschätzung der natürlichen Variabilität und der Modellierung des Klimasystems sind deutlich geringer (Hawkins und Sutton, 2009).

1.4 Klimavariabilität und Vorhersagbarkeit
1.4 Climate variability and predictability

Größen wie Temperatur, Wind, etc. zeigen in der Atmosphäre ständige Schwankungen in der Zeit, aber auch von Ort zu Ort. Räumlich kleinskalige Änderungen sind mit kurzlebigen Schwankungen gekoppelt, großskalige Änderungen dagegen mit längeren zeitlichen Variationen. Von außen der Erde aufgeprägt sind großskalige und langsame Variationen, wie das Verteilungsmuster der Energiebilanz (Überschuss in den niederen Breiten, Defizit in den hohen Breiten), die Jahreszeiten, und die astronomischen Erdbahnparameter, welche Eiszeiten und Warmzeiten auslösen können (Roe, 2006). Diese externen Antriebe auf der globalen Skala bewirken eine kaum überschaubare Vielzahl von großräumigen, mittleren und kleinräumigen Prozessen, wie beispielsweise Hoch- und Tiefdruckgebiete, Wolken, turbulente Bewegungen in Bodennähe, etc. Oberflächenstrukturen, wie die Gegensätze zwischen Land- und Was-



Abdruck mit freundlicher Genehmigung von Springer Science+Business Media: Climatic Change, The representative concentration pathways: an overview, 109, 2011, S. 18, van Vuuren et al., Abb. 4

Abbildung 1.11 Links: Entwicklung des Anteils der Verbrennung fossilen Kohlenstoffs an der Energieerzeugung (carbon factor). Mitte: Entwicklung des Energieaufwandes pro Wirtschaftsleistung. Rechts: Anteile von fossiler Energieerzeugung ohne CCS, Energieerzeugung aus erneuerbaren Quellen und Kernenergie, sowie Energieerzeugung mit CCS bis zum Jahr 2100 in den vier RCP (=RCP3PD). Man beachte den hohen Anteil von Energieerzeugung mit CCS in den späteren Jahrzehnten des RCP2.6. Alle vier RCPs beginnen ohne CCS und ca. 15 % erneuerbare und nukleare Energie. Quelle: van Vuuren et al. (2011)

Figure 1.11 Temporal evolution of global mean carbon factor (left) and energy intensity (middle) for the RCP and SRES scenarios noted above. Right: Ternary graph of partitioning primary energy production into fossil production with CCS, fossil production without CCS and renewable + nuclear energy production. All four RCPs start with no CCS and 15 % renewable + nuclear production but end at very different regions of the graph in 2100. Consider the high share of CCS in RCP2.6 (=RCP3PD) in later decades. Source: van Vuuren et al. (2011)

seroberflächen, vor allem aber auch Gebirge (siehe dazu Abschnitt 1.5), produzieren eigene Zirkulationssysteme. Andere Systeme, wie das El-Niño-Phänomen, entstehen durch Kopplung von ozeanischen und atmosphärischen Vorgängen, verbunden mit internen nichtlinearen Wechselwirkungen der beteiligten Klimasubsysteme. Diese Komplexität macht sowohl die Beobachtung als auch die Simulation des Klimas so schwierig, denn jede beobachtete oder simulierte Variation kann unterschiedliche Ursachen haben – nicht alles ist Klimawandel!

Ein gewisses Verständnis des Klimasystems als chaotisches dynamisches System ist hilfreich, um diese Problematik besser einordnen zu können. Die Vorgänge in der Atmosphäre, im Ozean, etc. lassen sich durch physikalische Gesetze beschreiben (mehr dazu in Abschnitt 1.5). Diese geben eine Veränderung als Folge eines momentanen Zustands und gegebenenfalls der externen Einflüsse an. Unterschiedliche Anfangszustände haben unterschiedliche Änderungen und damit unterschiedliche Entwicklungen des Systems zur Folge. Es gibt relativ stabile Verhältnisse, und weniger stabile. Bei einem wenig stabilen Zustand kann eine kleine Änderung in die eine oder andere Richtung nach nicht allzu langer Zeit zu ganz unterschiedlichen Entwicklungen führen. Dies ist der Grund, warum Wettervorhersage nur für einen begrenzten Zeitraum möglich ist und warum Vorhersagen manchmal schon nach ein oder zwei Tagen fehlerhaft sein können. Bei Klimauntersuchungen betrachtet man aber nicht das Wetter, d. h. den Zustand der Atmosphäre auf der Zeitskala von Stunden bis Tagen, sondern Mittelwerte und Variabilität der Klimaparameter auf Zeitskalen von Jahrzehnten. Der größte Teil des „Chaos" der Wetterschwankungen mittelt sich dabei weg, wobei eine Betrachtung von statistischen Parametern für 10 oder 20 Jahre noch nicht alle quasi-stochastischen Schwankungen eliminiert, was einen Teil der Unsicherheiten der Ergebnisse von Klimamodellen begründet. Darüber hinaus gibt es jedoch auch nichtlineare (und damit potentiell chaotische) dynamische Prozesse auf langen Zeitskalen (Jahre und Jahrzehnte, gegenüber Tagen bei den typischen Wetterphänomenen), vor allem solche, die mit dem Ozean verbunden sind.

Seit einigen Jahren wird immer deutlicher, dass z. B. die Klimaentwicklung in Europa wesentlich von Prozessen im Nordatlantik geprägt ist, die auf einer Zeitskala von Jahren bis Jahrzehnten verlaufen (siehe z. B. Latif et al., 2006; Yang et al., 2013). Die Initialisierung des Ozeans (und anderer Parameter wie Meereis) in Klimamodellen kann daher vor allem für die ersten ca. 10 Jahre von Klimasimulationen relevant sein, und andererseits muss man damit rechnen, dass eine nicht gut genug initialisierte Simulation gerade am Anfang deutlich von der realen Entwicklung abweicht. Dazu kommt,

dass das Klimasignal sich im Lauf der Simulation verstärkt und am Anfang schwach ist gegenüber interner Variabilität, aber auch den Einflüssen der Anfangsbedingungen. Deshalb wird zunehmend die „Vorhersagbarkeit des Klimas" (im Sinne einer Auflösung und Vorhersage von mehrjährigen Klimavariationen) diskutiert und untersucht (siehe z. B. Boer, 2011). Nur auf Emissionsszenarien basierende Rechnungen sind Projektionen; solche, die versuchen, die mehrjährigen Variationen in der kommenden Dekade realistisch zu erfassen, kann man – für jenen Zeitraum, der von den Emissionsszenarien noch nicht stark beeinflusst ist – als Prognose bezeichnen. Dieser Themenbereich steht noch sehr am Anfang, ist aber von großer praktischer Bedeutung, einerseits weil die Klimafolgenforschung stark auf die nahe zeitliche Zukunft fokussiert, andererseits weil Divergenzen zwischen Simulationen und Beobachtungen Misstrauen in Bezug auf die Qualität der Klimamodellierung wecken können.

In diesem Zusammenhang ist auch zu beachten, dass die Veränderung des Strahlungsantriebs auf dieser kurzen Zeitskala weniger von den langlebigen Treibhausgasen wie CO_2 geprägt ist, als von kurzlebigen und auch in ihrer Emission stärker variablen Substanzen, etwa Methan, aber vor allem auch Aerosolen (seien sie direkt emittiert oder Folgeprodukte von gasförmigen Emissionen). Es ist wichtig, diese Unterschiede zwischen nahen (Zeithorizont bis 2030) und ferneren Entwicklungen zu verstehen.

1.5 Modelle für die Klimasimulation
1.5 Models for climate simulation

1.5.1 Arten von Klimamodellen und ihre Funktionsweise

Aufgrund der im vorherigen Abschnitt dargelegten Wechselwirkungen zwischen den Skalen und zwischen Ozean und Atmosphäre sowie der generellen Komplexität des Klimasystems sind detaillierte und verlässliche Aussagen zur künftigen Entwicklung des Klimas unter den durch die verschiedenen Emissionsszenarien vorgegebenen Randbedingungen nur durch Modellsimulationen möglich. In diesen Simulationen müssen so genannte äußere Einflüsse (auf Englisch häufig als „forcing" bezeichnet, wobei dieser Begriff allgemeiner gemeint ist als nur „radiative forcing") vorgegeben werden, während dann das Modell die Reaktion des Klimasystems auf diese Einflüsse wiedergibt. Diese äußeren Einflüsse können unterteilt werden in natürliche (vor allem Ausstoß von Spurenstoffen bei Vulkanausbrüchen, Änderung der empfangenen Strahlungsenergie von der Sonne aufgrund von Änderungen der Erdbahnparameter und der Solarkonstante) und anthropogene (vor allem Ausstoß von Spurenstoffen durch verschiedene menschliche Aktivitäten, Änderung der Landoberflächen).

Das Klima ist zwar über atmosphärische Parameter wie Lufttemperatur, Niederschlag etc. definiert, für eine langfristige Betrachtung reicht es aber nicht aus, lediglich das Verhalten der Atmosphäre zu simulieren. Für die Umverteilung der Energie von den niederen zu den hohen Breiten sind nicht nur Luftströmungen sondern auch Meeresströmungen wichtig, und darüber hinaus hat der Zustand der Meeresoberfläche großen Einfluss auf die Atmosphäre. Die Zirkulation im Ozean ist zwar langsamer als die in der Atmosphäre, jedoch ist bereits ab einem Zeitraum von einigen Wochen die Wechselwirkung zwischen beiden Systemen für das Wetter wichtig. Für die Zukunft des Klimas ist sie essentiell, weshalb seit vielen Jahren gekoppelte Atmosphären-Ozean-Modelle (englisch: atmosphere-ocean general circulation models, AOGCM) verwendet werden.

Jedoch steht nicht nur der Ozean in Wechselwirkung mit der Atmosphäre, sondern auch die Erdoberfläche mit ihrer Vegetation, dem Grundwasser, etc., sowie die Kryosphäre, das heißt, die Eisschilde der Antarktis und Grönlands sowie anderer arktischer Landregionen, das Meereis, die winterliche Schneedecke und die außerpolaren Gletscher. Bereits für den 4. IPCC-Bericht wurden Modelle verwendet, welche Prozesse in und zwischen diesen Klimasubsystemen mit berücksichtigen und damit einen wesentlichen Schritt von reinen Atmosphären-Ozean-Modellen hin zu Erdsystem-Modellen (englisch: earth system model, ESM) machen (Flato, 2011). In den neuesten Simulationen, die auch dem 5. IPCC-Bericht zugrunde liegen, sind diese Modelle noch dahingehend erweitert worden, dass sie auch biogeochemische Kreisläufe beschreiben, insbesondere auch die chemischen Umwandlungen wichtiger Spurenstoffe in der Atmosphäre wie Schwefelverbindungen und Ozon. Es wurden auch nicht mehr Konzentrationsverläufe der klimarelevanten Spurenstoffe vorgegeben, sondern diese werden aus den Emissionen berechnet (Flato, 2011). Der Einfachheit halber soll in der Folge einfach von „Klimamodellen" gesprochen werden.

Hinsichtlich der Funktionsweise der Modelle wird im Folgenden primär auf die atmosphärische Modellkomponente Bezug genommen. Ein solches Modell berechnet die laufende Veränderung des Zustands der Atmosphäre, das heißt, die dreidimensionale Verteilung von Variablen wie Temperatur, Luftdruck, Luftfeuchte, Wind, etc., und zwar ausgehend von einem vorgegebenen Anfangszustand. Die Veränderungen werden in kleinen Zeitschritten berechnet und ergeben sich

aus grundlegenden physikalischen Gesetzen, insbesondere der Erhaltung der Masse, des Impulses und der Energie. Die räumlichen Strukturen werden durch ein Rechengitter oder äquivalente Methoden (spektrale Darstellung) wiedergegeben. Dieses Rechengitter hat eine gegebene Auflösung, horizontal und vertikal. Prozesse, die entweder durch das Gitter nicht aufgelöst werden können oder für eine exakte Behandlung zu komplex sind, werden durch semi-empirische Beziehungen zwischen den aufgelösten Variablen näherungsweise berücksichtigt (so genannte Parametrisierungen).

Es ist wichtig, zu verstehen, dass ein derartiges Modell keine statistische Extrapolation aus der Vergangenheit darstellt, sondern das Verhalten des Systems aufgrund allgemein gültiger physikalischer Gesetze simuliert. Im Wesentlichen entspricht der atmosphärische Teil eines Klimamodells einem globalen Wettervorhersagemodell (welche sich mittlerweile ebenfalls in Richtung Erdsystemmodell entwickeln, da dies für mittelfristige oder gar saisonale Vorhersagen vorteilhaft, wenn nicht gar notwendig ist). Auch Rückkoppelungsprozesse sind grundsätzlich in solchen Modellsystemen abgebildet, jedoch muss man die Frage stellen, mit welcher Genauigkeit und Vollständigkeit dies der Fall ist.

1.5.2 Unsicherheiten der Modelle

Ein Simulationsmodell ist eine quantitative, näherungsweise Beschreibung des natürlichen Systems. Fehler und daraus resultierende Unsicherheit bezüglich der Modellergebnisse sind zunächst durch die limitierte Modellauflösung und die numerischen Lösungsverfahren gegeben. Die limitierte Modellauflösung macht sich überall da negativ bemerkbar, wo Prozesse nicht oder nicht vollständig aufgelöst werden können (siehe u. a. Berckmans et al., 2013; Wen et al., 2012). Das sind vor allem Prozesse an der Erdoberfläche, im Bereich der Tropopause und bei Konvektion (Quellwolken bis hin zu Gewittersystemen). Deshalb wird in jeder Modellgeneration die Auflösung entsprechend den gestiegenen Rechenkapazitäten verbessert. Für die besten Modelle, welche dem 5. IPCC-Bericht zugrunde liegen, ist die horizontale Auflösung nun bei rund 100 km Gitterweite angelangt (Taylor et al., 2012). Es ist jedoch offensichtlich, dass auch eine solche Auflösung Gebirge nur sehr grob wiedergeben kann. Dies ist einer der Hauptgründe, warum in einer Region wie Österreich regionale Klimamodellierung als wichtigstes „Downscaling"-Verfahren essentiell für belastbare Aussagen über künftige Klimaentwicklungen ist (vergleiche Band 1, Kapitel 4). Wegen der nichtlinearen Wechselwirkungen müssten alle Rückkoppelungseffekte z. B. von gebirgsinduzierten Effekten in den globalen Klimamodellen als Parametrisierung eingehen, was aber derzeit nicht möglich ist.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Güte der verwendeten Parametrisierungen. Dies betrifft vor allem den Austausch von Wärme, Wasserdampf, Impuls und Spurenstoffen zwischen den verschiedenen Oberflächenarten und der Atmosphäre. Auch die Simulation von Niederschlag und des Verhaltens von Aerosolen in der Atmosphäre ist mit relevanten Unsicherheiten behaftet. Weitere Unsicherheiten ähnlicher Natur sind in den Modellen für die anderen Klimasubsysteme vorhanden.

Schließlich sind auch einfache Fehler, zum Beispiel im Programmcode, nie gänzlich ausschließbar.

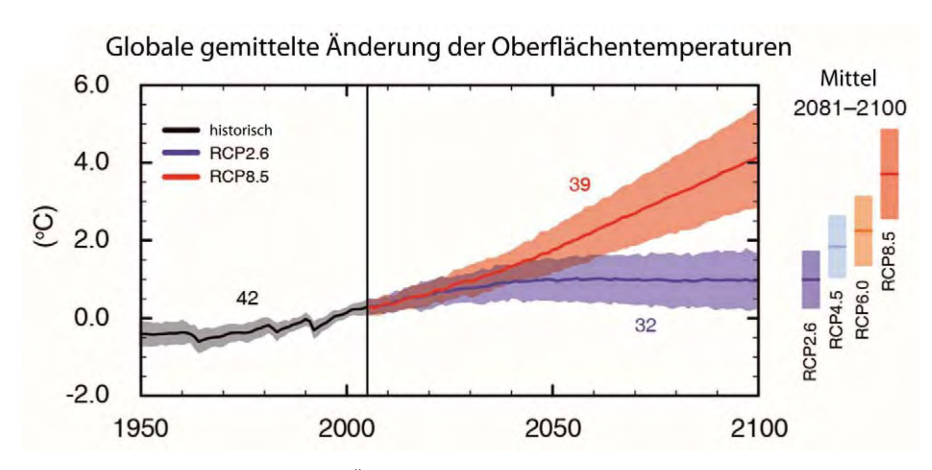
Es ist also festzuhalten, dass Klimamodelle zwar auf wohl gesicherten physikalischen Grundlagen und etablierten numerischen Lösungsmethoden basieren, aber aufgrund der nötigen Vereinfachungen und der teilweise nur mäßig bekannten Interaktionsprozesse dennoch mit Unsicherheiten behaftet sind. Um die Relevanz dieser Unsicherheiten zu beurteilen und die Verlässlichkeit der Modelle zu untersuchen, sind daher verschiedene Verfahren eingeführt worden. Einerseits macht man Simulationen der Vergangenheit, welche man mit Beobachtungen vergleichen kann (Abschnitt 1.5.3), andererseits werden so genannte Ensembles gerechnet und genützt. Methode und Wert von Ensemblesimulationen werden im Folgenden kurz umrissen.

Mit „Ensemble" wird eine Anzahl von Simulationen bezeichnet, die grundsätzlich alle dieselbe Aufgabe lösen, aber dies auf unterschiedliche Weise tun. Die Unterschiede können sein:

- Unterschiedliche Modelle (jedes Modell verwendet etwas andere Methoden für die Numerik, die Parametrisierungen, etc.);
- Unterschiedliche Parameterwahl bei einem Modell (Variation der Parameter einer Parametrisierung innerhalb ihres Unsicherheitsbereiches) bzw. Variation der Parametrisierungsverfahren;
- Unterschiedliche Anfangsbedingungen.

Der letzte Punkt bedarf einer Erläuterung: Während die Unsicherheit in Bezug auf den Anfangszustand der Atmosphäre die weitere Entwicklung des Klimas (nicht des Wetters!) wenig beeinflusst, ist die Unsicherheit bei anderen Parametern, insbesondere des Ozeans, für einen Zeitraum von Jahren spürbar. Wegen der nichtlinearen Wechselwirkungen und Rückkoppelungsmechanismen ist auch längerfristig ein Einfluss grundsätzlich möglich.

In einem kurzfristigen Zeithorizont, etwa bis 2030, kann daher der Anfangszustand durchaus wesentlich für die Ent-



Quelle: IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Figure SPM.7. [Stocker,T.F., D.Qin, G.-K. Plattner, M.Tignor, S.K.Allen, J.Boschung, A.Nauels, Y.Xia, V.Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA. Legenden auf Deutsch übersetzt

Abbildung 1.12 Global gemittelte Änderung der bodennahen Lufttemperaturen aus den Simulationen des 5. IPCC Sachstandsberichts 2013 (Mittel aus dem Modellensemble, die Zahlen geben die Größe des jeweiligen Ensembles an). Mit farbigen Kurven dargestellt sind der unterste (RCP2.6) und oberste (RCP8.5) Konzentrationspfad. Die mittleren Änderungen für 2081–2100 sind rechts des Randes für alle vier Pfade angegeben. Bezugszeitraum ist 1986–2005 (die vorindustrielle Periode liegt noch um 0,6 °C darunter). Der eingefärbte Bereich bzw. die Länge der Balken rechts geben die Unsicherheit aus dem Modellensemble (5. bis 95. Perzentil) an

Figure 1.12 Globally averaged change of near-ground air temperatures in the simulations of the 5th IPCC Report 2013 (mean of model ensemble, numbers indicate size of the respective ensemble). Coloured curves are given for the lowest (RCP2.6) and highest (RCP8.5) concentration pathways. The mean changes for 2081–2100 are indicated outside the right margin for the four pathways. Reference period is 1986–2005 (the pre-industrial periods is 0.6 °C lower). The coloured areas (respectively, the length of the bars to the right) indicate the uncertainties of the model ensemble (5th to 95th percentile)

wicklung sein. Im Rahmen der IPCC-Sachstandsberichte wird daher stark von Ensembles Gebrauch gemacht. Ergebnisse sind typischerweise Ensemblemittelwerte und Unsicherheiten werden oft aus Ensemble-Bandbreiten gewonnen.

1.5.3 Retrospektive Simulationen

Retrospektive Simulationen sind Simulationen des vergangen Klimas mit vorgegebenen äußeren Einflussgrößen. Im Vergleich mit den Beobachtungen – welche in die Simulation ja nicht eingehen – kann eine Aussage über die Fähigkeit der Modelle gewonnen werden, typische Prozesse und Schwankungen des Klimasystems zu simulieren. Die IPCC-Berichte legen dies im Detail dar (Randall et al., 2007; IPCC, 2013). Insbesondere gelingt es den Modellen, die wesentlichen beobachteten Muster der Temperatur und anderer Größen wiederzugeben. Auch die wesentlichen Eigenheiten des zeitlichen Verlaufs der globalen Mitteltemperatur in der Periode 1870 bis 2012 werden korrekt wiedergegeben, wie der verstärkte Temperaturanstieg ab Mitte des 20. Jahrhunderts und die Temperatureinbrüche nach starken Vulkaneruptionen (zum Thema der abgeschwächten globalen Erwärmung in den vergangenen 10 bis 15 Jahren siehe oben, Abschnitt 1.3.3). Die Schwachstellen wurden seit dem 4. IPCC-Bericht verringert, zum Beispiel in Bezug auf das arktische Meereis; jedoch ist die Simulation der mittleren Zugbahnen von Tiefdruckgebieten, sowie der Wolkenbedeckung und des Niederschlags weiterhin in manchen Weltregionen verbesserungswürdig (IPCC, 2013, Chapter 9).

Eine weitere, wichtige Aufgabe haben die retrospektiven Simulationen bei der Beantwortung der Frage, ob bzw. in wie weit man bereits einen anthropogenen Klimawandel beobachten kann. Wegen der hohen natürlichen Variabilität der Atmosphäre ist dies aus Beobachtungen allein nicht leicht zu beantworten. Eine Simulation erlaubt es, den hypothetischen Verlauf des Klimas der vergangenen Jahrzehnte mit und ohne die anthropogenen Einflüsse wie CO_2-Emission, etc. zu berechnen und beide jeweils mit Beobachtungen zu vergleichen (Abschnitt 1.3.3).

1.5.4 Szenariensimulationen

Simulationen für das zukünftige Klima basieren auf so genannten Szenarien für die künftige Entwicklung der Treibhausgasemissionen und Landnutzungsänderungen. Im IPCC-Kontext (Moss, 2010) werden vor allem Szenarien bis 2100 verwendet, es gibt jedoch auch längerfristige Szenarien. Andererseits stützt sich die Klimafolgenforschung oft auf deutlich vor 2100 liegende Zeiten, etwa bis 2030 und 2050. Neben den realistischen, auf sozioökonomischen Modellen beruhenden Szenarien (für den 5. IPCC-Bericht die „Representative Concentration Pathways [RCP], siehe Abschnitt 1.3.4) gibt es auch idealisierte Szenarien und damit angetriebene Simulationen, wie etwa ein jährlicher Anstieg der CO_2-Konzentration

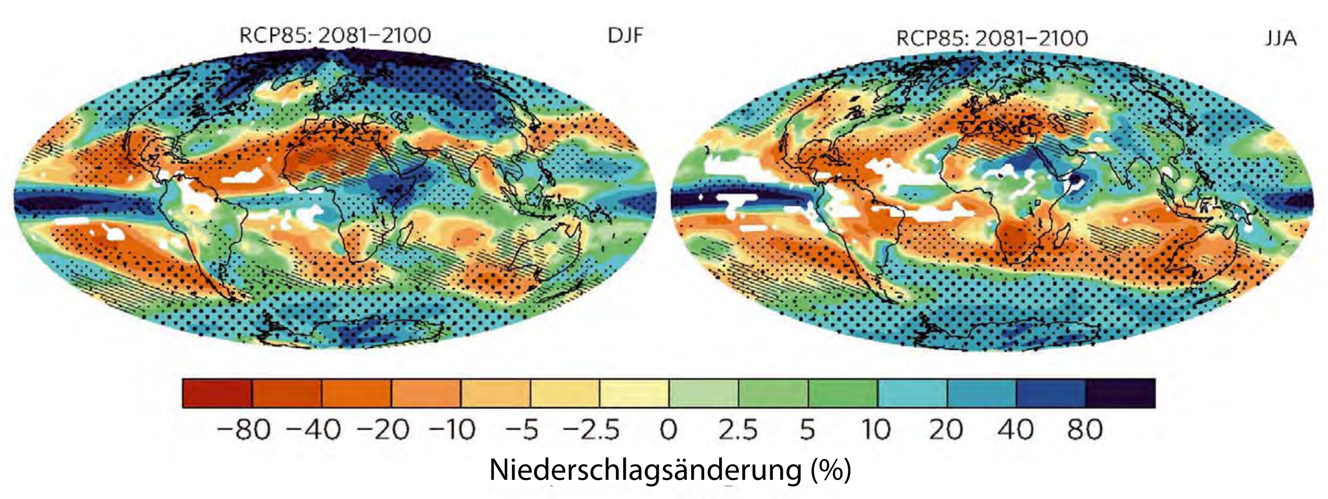


Abbildung 1.13 Simulierte Änderung des Niederschlags (Periode 2081–2100 im Vergleich zu 1986–2005) in den Monaten Dezember, Jänner, Feber (links) und Juni, Juli, August (rechts) nach Berechnungen für den 5. IPCC-Bericht, Konzentrationspfad 8.5 (relativ starke Treibhausgasemissionen). Die Werte sind Mittel aus dem Modellensemble, wobei Regionen mit statistisch signifikanten Änderungen punktiert, solche mit insignifikanten Änderungen schraffiert unterlegt sind. In weißen Gebieten gibt das Ensemble keine einheitliche Aussage. Quelle: Knutti und Sedlácek (2013)

Figure 1.13 Simulated precipitation change (period 2081–2100 compared to 1986–2005) in December, January, February (left) and June, July, August (right) according to calculations performed for the 5th IPCC Assessment Report according to Representative Concentration Pathway 8.5 (relatively strong greenhouse gas emissions). Values are means of the model ensemble. Regions with statistically significant changes are stippled, those with insignificant changes hatched. In white areas, the ensemble did not yield a uniform result. Source: Knutti and Sedlácek (2013)

in der Atmosphäre um 1 %, bis eine Verdoppelung oder Vervierfachung erreicht ist.

1.6 Ausgewählte Ergebnisse globaler Klimaprojektionen
1.6 Selected results of global climate projections

Die Ergebnisse globaler Klimaprojektionen sind im Detail dem 5. Sachstandsbericht (IPCC, 2013) der IPCC-Arbeitsgruppe I zu entnehmen. Im Hinblick auf die erwartbaren Klimaänderungen in Europa werden diese in Band 1, Kapitel 4 diskutiert. Zur besseren Einordnung der Klimadiskussion im Allgemeinen und dieser in Band 1, Kapitel 4 vorgestellten regionalen Ergebnisse seien im Folgenden einige wichtige Ergebnisse globaler Modelle zusammengefasst.

Die globale Mitteltemperatur in Bodennähe dient als primärer Parameter zur allgemeinen Beschreibung der anthropogenen Erwärmung der Erdatmosphäre. Abbildung 1.12 zeigt die Ergebnisse von Modellsimulationen aus dem 5. IPCC-Bericht. Das international akkordierte politische Ziel von maximal 2 °C Erwärmung gegenüber dem vorindustriellen Temperaturniveau wird nur im ehrgeizigsten Konzentrationspfad (RCP2.6) erreicht. Man erkennt auch, dass erst ab ca. Mitte des 21. Jahrhunderts größere Unterschiede zwischen den Szenarien auftreten. Bis dahin wird die Unsicherheit von den Unterschieden verschiedener Simulationen innerhalb des Ensembles für den jeweiligen Pfad bestimmt. Die maximalen Werte des globalen Strahlungsantriebs werden im RCP2.6-Szenario vor dem Jahr 2050 erreicht, im RCP4.5-Szenario tritt eine Stabilisierung ab ca. 2080 und im 6.0-Szenario ab ca. 2150 ein. Dennoch kommt es auch nach diesen Zeitpunkten zu einem Temperaturanstieg, was an der Trägheit des Klimasystems und insbesondere der Ozeane liegt.

Der Anstieg des Meeresspiegels wird noch Jahrhunderte andauern – allerdings lassen sich sowohl Tempo als auch Endwert durch Emissionsminderungsmaßnahmen beeinflussen. Für das Jahr 2300 erhielten Meehl et al. (2012) globale Mittelwerte von ca. 50–300 cm, je nach Emissionsszenario, wobei diese Werte vor allem hinsichtlich des Beitrags der Eisschmelze sehr unsicher sind. Der IPCC-Bericht (IPCC, 2013) erwartet für das Jahr 2100 einen Anstieg gegenüber dem Ende des 20. Jahrhunderts um etwa 25–100 cm, wobei auch hier die große Spannweite nicht nur die unterschiedlichen Konzentrationspfade (Mittelwert der Modelle ist 43 cm für RCP2.6 und 73 cm für RCP8.5), sondern auch die Unsicherheiten der Modellierung ausdrückt (z. B. zwischen 53 und 97 cm für RCP8.5).

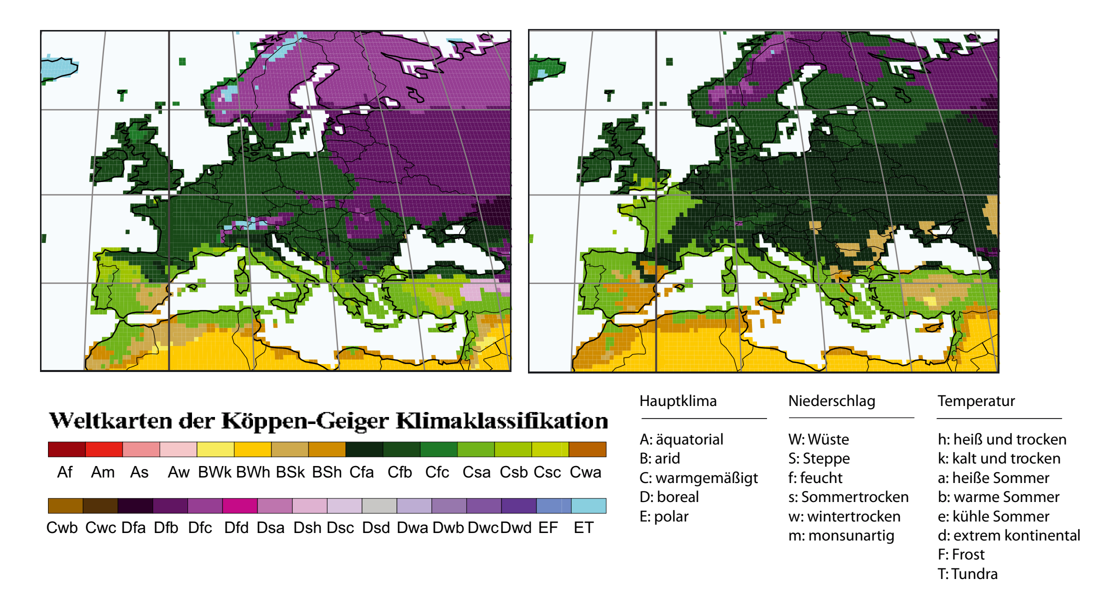


Abbildung 1.14 Klimazonen nach der Klassifikation von Köppen und Geiger für die Perioden 1976–2000 (links) und 2076–2100, berechnet für das A1FI-Szenario des 4. IPCC-Berichts. Ausschnitt aus den Weltkarten von Rubel und Kottek (2010), deutschsprachige Version von F. Rubel (pers. Mitt., September 2013)

Figure 1.14 Climate zones according to the classification of Köppen and Geiger for the periods a) 1976–2000 (left) and b) 2076–2100 (right), calculated for the A1FI scenario of the 4th IPCC Assessment Report. Detail of the world maps by Rubel and Kottek (2010), German version from F. Rubel (pers. communication, September 2013)

Neben der Temperatur ist der Niederschlag ein zentraler Parameter. Abbildung 1.13 zeigt projizierte globale Niederschlagsverteilungen für ein Szenario mit starkem Temperaturanstieg (ca. 4 °C im hier gezeigten Zeitraum [2081–2100] gegenüber vorindustriellen Verhältnissen). Dadurch treten die Tendenzen besonders deutlich zu Tage. Trockene Gebiete werden noch trockener und sie weiten sich aus, während es in den hohen Breiten und Teilen der Tropen zu verstärkten Niederschlägen kommt. Für Mitteleuropa wäre in diesem Szenario mit Niederschlagsrückgängen im Sommer von ca. 20–40 % zu rechnen. Im Mittelmeerraum ist auch im Winter eine Niederschlagsverringerung zu erwarten, sodass dieses Gebiet mit massiver Austrocknung rechnen muss. Hingegen würde der Winterniederschlag nördlich der Alpen etwas zunehmen.

Abbildung 1.14 zeigt aus beobachteten bzw. modellierten Temperatur- und Niederschlagsfeldern abgeleitete Klimazonen in Europa für jeweils die letzten 25 Jahre des 20. und des 21. Jahrhunderts (A1FI Szenario aus dem 4. IPCC-Bericht, fossil-intensiv, d. h. hohe Treibhausgasemissionen, vergleichbar mit RCP8.5; Rubel und Kottek, 2010). Hier werden also Temperatur- und Niederschlagseffekte zusammengefasst. Wie man sieht, kommt es bei diesem Szenario zu großflächigen Verschiebungen der Klimazonen. In Mitteleuropa wird temperiertes Klima mit warmen Sommern zu temperiertem Klima mit heißen Sommern. Die sommertrockenen Klimate breiten sich nach Norden aus, Schnee- und Eisklimate ziehen sich sowohl in den Gebirgen (wegen der 0,5° Auflösung nur näherungsweise interpretierbar) als auch in den hohen Breiten zurück.

1.7 Literaturverzeichnis
1.7 References

Allan, R., Brohan, P., Compo, G.P., Stone, R., Luterbacher, J., Brönnimann, S., 2011. The international atmospheric circulation reconstructions over the Earth (ACRE) initiative. Bulletin of the American Meteorological Society 92, 1421–1425. doi:10.1175/2011BAMS3218.1

Andreae, M.O., Gelencsér, A., 2006. Black carbon or brown carbon? The nature of light-absorbing carbonaceous aerosols. Atmos. Chem. Phys. 6, 3131–3148. doi:10.5194/acp-6-3131-2006

Anthes, R.A., 2011. Exploring Earth's atmosphere with radio occultation: contributions to weather, climate and space weather. Atmospheric Measurement Techniques 4, 1077–1103. doi:10.5194/amt-4-1077-2011

Balmaseda, M.A., Mogensen, K., Weaver, A.T., 2013a. Evaluation of the ECMWF ocean reanalysis system ORAS4. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 139, 1132–1161. doi:10.1002/qj.2063

Balmaseda, M.A., Trenberth, K.E., Källén, E., 2013b. Distinctive climate signals in reanalysis of global ocean heat content. Geophysical Research Letters 40, 1754–1759. doi:10.1002/grl.50382

Berckmans, J., Woollings, T., Demory, M.-E., Vidale, P.-L., Roberts, M., 2013. Atmospheric blocking in a high resolution climate model: influences of mean state, orography and eddy forcing. Atmospheric Science Letters 14, 34–40. doi:10.1002/asl2.412

Boer, G.J., 2011. Decadal potential predictability of twenty-first century climate. Climate Dynamics 36, 1119–1133. doi:10.1007/s00382-010-0747-9

Bond, T.C., Doherty, S.J., Fahey, D.W., Forster, P.M., Berntsen, T., DeAngelo, B.J., Flanner, M.G., Ghan, S., Kärcher, B., Koch, D., Kinne, S., Kondo, Y., Quinn, P.K., Sarofim, M.C., Schultz, M.G., Schulz, M., Venkataraman, C., Zhang, H., Zhang, S., Bellouin, N., Guttikunda, S.K., Hopke, P.K., Jacobson, M.Z., Kaiser, J.W., Klimont, Z., Lohmann, U., Schwarz, J.P., Shindell, D., Storelvmo, T., Warren, S.G., Zender, C.S., 2013. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 118, 5380–5552. doi:10.1002/jgrd.50171

Bryden, H.L., Longworth, H.R., Cunningham, S.A., 2005. Slowing of the Atlantic meridional overturning circulation at 25°N. Nature 438, 655–657. doi:10.1038/nature04385

Church, J.A., White, N.J., 2011. Sea-level rise from the late 19th to the aarly 21st century. Surveys in Geophysics 32, 585–602. doi:10.1007/s10712-011-9119-1

Compo, G.P., Whitaker, J.S., Sardeshmukh, P.D., Matsui, N., Allan, R.J., Yin, X., Gleason, B.E., Vose, R.S., Rutledge, G., Bessemoulin, P., Brönnimann, S., Brunet, M., Crouthamel, R.I., Grant, A.N., Groisman, P.Y., Jones, P.D., Kruk, M.C., Kruger, A.C., Marshall, G.J., Maugeri, M., Mok, H.Y., Nordli, ø., Ross, T.F., Trigo, R.M., Wang, X.L., Woodruff, S.D., Worley, S.J., 2011. The twentieth century reanalysis project. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 137, 1–28. doi:10.1002/qj.776

Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A.J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M.A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A.C.M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A.J., Haimberger, L., Healy, S.B., Hersbach, H., Hólm, E.V., Isaksen, L., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A.P., Monge-Sanz, B.M., Morcrette, J.-J., Park, B.-K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.-N., Vitart, F., 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 137, 553–597. doi:10.1002/qj.828

Douglass, D.H., Christy, J.R., Pearson, B.D., Singer, S.F., 2007. A comparison of tropical temperature trends with model predictions. International Journal of Climatology 28, 1693–1701. doi:10.1002/joc.1651

Ebita, A., Kobayashi, S., Ota, Y., Moriya, M., Kumabe, R., Onogi, K., Harada, Y., Yasui, S., Miyaoka, K., Takahashi, K., Kamahori, H., Kobayashi, C., Endo, H., Soma, M., Oikawa, Y., Ishimizu, T., 2011. The Japanese 55-year reanalysis ‚JRA-55‘: An Interim Report. SOLA 7, 149–152. doi:10.2151/sola.2011-038

Eichler, A., Olivier, S., Henderson, K., Laube, A., Beer, J., Papina, T., Gäggeler, H.W., Schwikowski, M., 2009. Temperature response in the Altai region lags solar forcing. Geophysical Research Letters 36. doi:10.1029/2008GL035930

Fasullo, J.T., Trenberth, K.E., 2008. The annual cycle of the energy budget. Part II: Meridional structures and poleward transports. Journal of Climate 21, 2313–2325. doi:10.1175/2007JCLI1936.1

Flanner, M.G., Shell, K.M., Barlage, M., Perovich, D.K., Tschudi, M.A., 2011. Radiative forcing and albedo feedback from the Northern Hemisphere cryosphere between 1979 and 2008. Nature Geoscience 4, 151–155. doi:10.1038/ngeo1062

Flato, G.M., 2011. Earth system models: an overview. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change 2, 783–800. doi:10.1002/wcc.148

Foelsche, U., Scherllin-Pirscher, B., Ladstädter, F., Steiner, A.K., Kirchengast, G., 2011. Refractivity and temperature climate records from multiple radio occultation satellites consistent within 0.05 %. Atmospheric Measurement Techniques 4, 2007–2018. doi:10.5194/amt-4-2007-2011

Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Berntsen, T., Betts, R., Fahey, D.W., Haywood, J., Lean, J., Lowe, D.C., Myhre, G., Nganga, J., Prinn, R., Raga, G., Schulz, M., Van Dorland, R., 2007. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

GEMS, 2012. GEMS Final Report. http://www.gmes-atmosphere.eu/documents/reports/GEMS_Final_Report.pdf.

Haigh, J.D., 1996. The impact of solar variability on climate. Science 272, 981–984. doi:10.1126/science.272.5264.981

Haigh, J.D., 2011. Solar influences on climate (Briefing paper 5). Grantham Institute on Climate Change, London. https://workspace.imperial.ac.uk/climatechange/Public/pdfs/Briefing%20Papers/Solar%20Influences%20on%20Climate.pdf.

Haimberger, L., Hantel, M. (Eds.), 2005. Circulation of the global atmosphere, in: Observed Global Climate, Landolt-Börnstein Series: Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology - New Series. Springer (Berlin, Heidelberg, New York), pp. 9.1–9.35.

Haimberger, L., Tavolato, C., Sperka, S., 2012. Homogenization of the global radiosonde temperature dataset through combined comparison with reanalysis background series and neighboring stations. Journal of Climate 25, 8108–8131. doi:10.1175/JCLI-D-11-00668.1

Hansen, J., Nazarenko, L., 2004. Soot climate forcing via snow and ice albedos. Proceedings of the National Academy of Sciences 101, 423–428. doi:10.1073/pnas.2237157100

Hansen, J., Sato, M., Ruedy, R., Lacis, A., Oinas, V., 2000. Global warming in the twenty-first century: An alternative scenario. Proceedings of the National Academy of Sciences 97, 9875–9880. doi:10.1073/pnas.170278997

Hantel, M. (Ed.), 2005. Numerical data and functional relationships in science and technology. Landolt-Börnstein, Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology, New Series, Group V, Volume 6, Springer.

Hasselmann, K., 1993. Optimal fingerprints for the detection of time-dependent climate change. Journal of Climate 6, 1957–1971. doi:10.1175/1520-0442(1993)006<1957:OFFTDO>2.0.CO;2

Hawkins, E., Sutton, R., 2009. The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions. Bulletin of the American Meteorological Society 90, 1095–1107. doi:10.1175/2009BAMS2607.1

Haywood, J.M., Bellouin, N., Jones, A., Boucher, O., Wild, M., Shine, K.P., 2011. The roles of aerosol, water vapor and cloud in future global dimming/brightening. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 116. doi:10.1029/2011JD016000

Hegerl, G., Zwiers, F., 2011. Use of models in detection and attribution of climate change. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change 2, 570–591. doi:10.1002/wcc.121

Hegerl, G.C., Crowley, T.J., Hyde, W.T., Frame, D.J., 2006. Climate sensitivity constrained by temperature reconstructions over the past seven centuries. Nature 440, 1029–1032. doi:10.1038/nature04679

Hegerl, G.C., von Storch, H., Hasselmann, K., Santer, B.D., Cubasch, U., Jones, P.D., 1996. Detecting greenhouse-gas-induced climate change with an optimal fingerprint method. Journal of Climate 9, 2281–2306. doi:10.1175/1520-0442(1996)009<2281:DGGICC>2.0.CO;2

Held, I.M., 2013. Climate science: The cause of the pause. Nature 501, 318–319. doi:10.1038/501318a

Held, I.M., Soden, B.J., 2006. Robust responses of the hydrological cycle to global warming. Journal of Climate 19, 5686–5699. doi:10.1175/JCLI3990.1

Ho, S., Hunt, D., Steiner, A.K., Mannucci, A.J., Kirchengast, G., Gleisner, H., Heise, S., von Engeln, A., Marquardt, C., Sokolovskiy, S., Schreiner, W., Scherllin-Pirscher, B., Ao, C., Wickert, J., Syndergaard, S., Lauritsen, K.B., Leroy, S., Kursinski, E.R., Kuo, Y.-H., Foelsche, U., Schmidt, T., Gorbunov, M., 2012. Reproducibility of GPS radio occultation data for climate monitoring: Profile-to-profile inter-comparison of CHAMP climate records 2002 to 2008 from six data centers. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 117. doi:10.1029/2012JD017665

Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., Van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C.A. (Eds.), 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis, Contribution on Working Group I to the Third Assessment Report ot the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.

Huybrecht, P., Miller, H., 2005. Flow and balance of the polar ice sheets, in: Hantel, M. (Ed.), Observed Global Climate, Landolt-Boernstein New Series. Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, pp. 13/1–13.

Inness, A., Baier, F., Benedetti, A., Bouarar, I., Chabrillat, S., Clark, H., Clerbaux, C., Coheur, P., Engelen, R.J., Errera, Q., Flemming, J., George, M., Granier, C., Hadji-Lazaro, J., Huijnen, V., Hurtmans, D., Jones, L., Kaiser, J.W., Kapsomenakis, J., Lefever, K., Leitão, J., Razinger, M., Richter, A., Schultz, M.G., Simmons, A.J., Suttie, M., Stein, O., Thépaut, J.-N., Thouret, V., Vrekoussis, M., Zerefos, C., the MACC team, 2013. The MACC reanalysis: an 8 yr data set of atmospheric composition. Atmospheric Chemistry and Physics 13, 4073–4109. doi:10.5194/acp-13-4073-2013

IPCC, 1995. The Science of Climate Change (AR2 WG 1 Report). Cambridge University Press, Cambridge.

IIPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

IPCC, 2013a: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker,T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Jacobson, M.Z., 2010. Short-term effects of controlling fossil-fuel soot, biofuel soot and gases, and methane on climate, Arctic ice, and air pollution health. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 115. doi:10.1029/2009JD013795

Jones, P.D., Groisman, P.Y., Coughlan, M., Plummer, N., Wang, W.-C., Karl, T.R., 1990. Assessment of urbanization effects in time series of surface air temperature over land. Nature 347, 169–172. doi:10.1038/347169a0

Kalnay, E., Cai, M., 2003. Impact of urbanization and land-use change on climate. Nature 423, 528–531. doi:10.1038/nature01675

Kandel, R., 2012. Understanding and measuring Earth's energy budget: From Fourier, Humboldt, and Tyndall to CERES and beyond. Surveys in Geophysics 33, 337–350. doi:10.1007/s10712-011-9162-y

Karl, T.R., Trenberth, K.E., 2003. Modern global climate change. Science 302, 1719–1723. doi:10.1126/science.1090228

Keeling, C.D., Bacastow, R.B., Bainbridge, A.E., Ekdahl, C.A., Guenther, P.R., Waterman, L.S., Chin, J.F.S., 1976. Atmospheric carbon dioxide variations at Mauna Loa Observatory, Hawaii. Tellus 28, 538–551. doi:10.1111/j.2153-3490.1976.tb00701.x

Kennedy, J.J., Rayner, N.A., Smith, R.O., Parker, D.E., Saunby, M., 2011a. Reassessing biases and other uncertainties in sea surface temperature observations measured in situ since 1850: 2. Biases and homogenization. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 116. doi:10.1029/2010JD015220

Kennedy, J.J., Rayner, N.A., Smith, R.O., Parker, D.E., Saunby, M., 2011b. Reassessing biases and other uncertainties in sea surface temperature observations measured in situ since 1850: 1. Measurement and sampling uncertainties. Journal of Geophysical Research 116. doi:10.1029/2010JD015218

Kim, D., Ramanathan, V., 2012. Improved estimates and understanding of global albedo and atmospheric solar absorption. Geophysical Research Letters 39. doi:10.1029/2012GL053757

Klein Goldewijk, K., 2001. Estimating global land use change over the past 300 years: The HYDE database. Global Biogeochemical Cycles 15, 417–433. doi:10.1029/1999GB001232

Klostermann, J., 2009. Das Klima im Eiszeitalter, 2. Auflage. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.

Knutti, R., Sedláček, J., 2013. Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. Nature Climate Change 3, 369–373. doi:10.1038/nclimate1716

Kopp, G., Lean, J.L., 2011. A new, lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance. Geophysical Research Letters 38. doi:10.1029/2010GL045777

Kosaka, Y., Xie, S.-P., 2013. Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling. Nature 501, 403–407. doi:10.1038/nature12534

Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F., 2006. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. Meteorologische Zeitschrift 15, 259–263. doi:10.1127/0941-2948/2006/0130

Lackner, B.C., Steiner, A.K., Hegerl, G.C., Kirchengast, G., 2011. Atmospheric climate change detection by radio occultation data using a fingerprinting method. Journal of Climate 24, 5275–5291. doi:10.1175/2011JCLI3966.1

Ladstädter, F., Steiner, A.K., Foelsche, U., Haimberger, L., Tavolato, C., Kirchengast, G., 2011. An assessment of differences in lower stratospheric temperature records from (A)MSU, radiosondes, and GPS radio occultation. Atmospheric Measurement Techniques 4, 1965–1977. doi:10.5194/amt-4-1965-2011

Latif, M., Collins, M., Pohlmann, H., Keenlyside, N., 2006. A review of predictability studies of Atlantic sector climate on decadal time scales. Journal of Climate 19, 5971–5987. doi:10.1175/JCLI3945.1

Le Quéré, C., Andres, R.J., Boden, T., Conway, T., Houghton, R.A., House, J.I., Marland, G., Peters, G.P., van der Werf, G.R., Ahlström, A., Andrew, R.M., Bopp, L., Canadell, J.G., Ciais, P., Doney, S.C., Enright, C., Friedlingstein, P., Huntingford, C., Jain, A.K., Jourdain, C., Kato, E., Keeling, R.F., Klein Goldewijk, K., Levis, S., Levy, P., Lomas, M., Poulter, B., Raupach, M.R., Schwinger, J., Sitch, S., Stocker, B.D., Viovy, N., Zaehle, S., Zeng, N., 2013. The global carbon budget 1959–2011. Earth System Science Data 5, 165–185. doi:10.5194/essd-5-165-2013

Le Quéré, C., Raupach, M.R., Canadell, J.G., Al, G.M. et, Al, C.L.Q. et, Marland, G., Bopp, L., Ciais, P., Conway, T.J., Doney, S.C., Feely, R.A., Foster, P., Friedlingstein, P., Gurney, K., Houghton, R.A., House, J.I., Huntingford, C., Levy, P.E., Lomas, M.R., Majkut, J., Metzl, N., Ometto, J.P., Peters, G.P., Prentice, I.C., Randerson, J.T., Running, S.W., Sarmiento, J.L., Schuster, U., Sitch, S., Takahashi, T., Viovy, N., van der Werf, G.R., Woodward, F.I., 2009. Trends in the sources and sinks of carbon dioxide. Nature Geosciences 2, 831–836. doi:10.1038/ngeo689

Lean, J., Beer, J., Bradley, R., 1995. Reconstruction of solar irradiance since 1610: Implications for climate change. Geophysical Research Letters 22, 3195–3198. doi:10.1029/95GL03093

Levitus, S., Antonov, J.I., Boyer, T.P., Baranova, O.K., Garcia, H.E., Locarnini, R.A., Mishonov, A.V., Reagan, J.R., Seidov, D., Yarosh, E.S., Zweng, M.M., 2012. World ocean heat content and thermosteric sea level change (0–2000 m), 1955–2010. Geophysical Research Letters 39, 1944–8007. doi:10.1029/2012GL051106

Link, P.M., Brzoska, M., Maas, A., Neuneck, G., Scheffran, J., 2013. Possible implications of climate engineering for peace and security. Bulletin of the American Meteorological Society 94, ES13–ES16. doi:10.1175/BAMS-D-12-00022.1

Loeb, N.G., Lyman, J.M., Johnson, G.C., Allan, R.P., Doelling, D.R., Wong, T., Soden, B.J., Stephens, G.L., 2012. Observed changes in top-of-the-atmosphere radiation and upper-ocean heating consistent within uncertainty. Nature Geoscience 5, 110–113. doi:10.1038/ngeo1375

Mann, M.E., Zhang, Z., Hughes, M.K., Bradley, R.S., Miller, S.K., Rutherford, S., Ni, F., 2008. Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia. Proceedings of the National Academy of Sciences 105, 13252–13257. doi:10.1073/pnas.0805721105

Mayer, M., Haimberger, L., 2012. Poleward atmospheric energy transports and their variability as evaluated from ECMWF reanalysis data. Journal of Climate 25, 734–752. doi:10.1175/JCLI-D-11-00202.1

Mayer, M., Trenberth, K.E., Haimberger, L., Fasullo, J.T., 2013. The response of tropical atmospheric energy budgets to ENSO. Journal of Climate 26, 4710–4724. doi:10.1175/JCLI-D-12-00681.1

Meehl, G.A., Arblaster, J.M., Fasullo, J.T., Hu, A., Trenberth, K.E., 2011. Model-based evidence of deep-ocean heat uptake during surface-temperature hiatus periods. Nature Clim. Change 1, 360–364. doi:10.1038/nclimate1229

Meehl, G.A., Hu, A., Tebaldi, C., Arblaster, J.M., Washington, W.M., Teng, H., Sanderson, B.M., Ault, T., Strand, W.G., White, J.B., 2012. Relative outcomes of climate change mitigation related to global temperature versus sea-level rise. Nature Climate Change 2, 576–580. doi:10.1038/nclimate1529

Menon, S., Akbari, H., Mahanama, S., Sednev, I., Levinson, R., 2010. Radiative forcing and temperature response to changes in urban albedos and associated CO2 offsets. Environmental Research Letters 5. doi:10.1088/1748-9326/5/1/014005

Min, S.-K., Zhang, X., Zwiers, F.W., Hegerl, G.C., 2011. Human contribution to more-intense precipitation extremes. Nature 470, 378–381. doi:10.1038/nature09763

Möller, F., 1973. Einführung in die Meteorologie. B.I. Wissenschaftsverlag, Mannheim.

Morice, C.P., Kennedy, J.J., Rayner, N.A., Jones, P.D., 2012. Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: The HadCRUT4 data set. Journal of Geophysical Research 117. doi:10.1029/2011JD017187

Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., van Vuuren, D.P., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G.A., Mitchell, J.F.B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.J., Stouffer, R.J., Thomson, A.M., Weyant, J.P., Wilbanks, T.J., 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. Nature 463, 747–756. doi:10.1038/nature08823

Nakicenovic, N., Swart, R. (Eds.), 2000. Special report on emission scenarios. IPCC. Cambridge University Press, UK.

Peters, G.P., Marland, G., Le Quéré, C., Boden, T., Canadell, J.G., Raupach, M.R., 2011. Rapid growth in CO_2 emissions after the 2008-2009 global financial crisis. Nature Climate Change 2, 2–4. doi:10.1038/nclimate1332

Philander, S.G., 1990. El Niño, La Niña, and the southern oscillation. International Geophysics Series 46. Academic Press, San Diego.

Pitman, A.J., Avila, F.B., Abramowitz, G., Wang, Y.P., Phipps, S.J., de Noblet-Ducoudré, N., 2011. Importance of background climate in determining impact of land-cover change on regional climate. Nature Climate Change 1, 472–475. doi:10.1038/nclimate1294

Prinz, R., Fischer, A., Nicholson, L., Kaser, G., 2011. Seventy-six years of mean mass balance rates derived from recent and re-evaluated ice volume measurements on tropical Lewis Glacier, Mount Kenya. Geophysical Research Letters 38, 20502–20507. doi:10.1029/2011GL049208

Randall, D.A., Wood, R.A., Bony, S., Colman, R., Fichefet, T., Fyfe, J., Kattsov, V., Pitman, J., Shukla, J., Srinivasan, J., Stouffer, R.J., Sumi, A., Taylor, K.E., 2007. Climate Models and Their Evaluation., in: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, M., Tignor, M., Miller, H.L. (Eds.), Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Rienecker, M.M., Suarez, M.J., Gelaro, R., Todling, R., Bacmeister, J., Liu, E., Bosilovich, M.G., Schubert, S.D., Takacs, L., Kim, G.-K., Bloom, S., Chen, J., Collins, D., Conaty, A., da Silva, A., Gu, W., Joiner, J., Koster, R.D., Lucchesi, R., Molod, A., Owens, T., Pawson, S., Pegion, P., Redder, C.R., Reichle, R., Robertson, F.R., Ruddick, A.G., Sienkiewicz, M., Woollen, J., 2011. MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications. Journal of Climate 24, 3624–3648. doi:10.1175/JCLI-D-11-00015.1

Roe, G., 2006. In defense of Milankovitch. Geophysical Research Letters 33. doi:10.1029/2006GL027817

Rubel, F., Kottek, M., 2010. Observed and projected climate shifts 1901-2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification. Meteorologische Zeitschrift 19, 135–141. doi:10.1127/0941-2948/2010/0430

Santer, B.D., Thorne, P.W., Haimberger, L., Taylor, K.E., Wigley, T.M.L., Lanzante, J.R., Solomon, S., Free, M., Gleckler, P.J.,

Jones, P.D., Karl, T.R., Klein, S.A., Mears, C., Nychka, D., Schmidt, G.A., Sherwood, S.C., Wentz, F.J., 2008. Consistency of modelled and observed temperature trends in the tropical troposphere. International Journal of Climatology 28, 1703–1722. doi:10.1002/joc.1756

Santer, B.D., Wigley, T.M.L., Mears, C., Wentz, F.J., Klein, S.A., Seidel, D.J., Taylor, K.E., Thorne, P.W., Wehner, M.F., Gleckler, P.J., Boyle, J.S., Collins, W.D., Dixon, K.W., Doutriaux, C., Free, M., Fu, Q., Hansen, J.E., Jones, G.S., Ruedy, R., Karl, T.R., Lanzante, J.R., Meehl, G.A., Ramaswamy, V., Russell, G., Schmidt, G.A., 2005. Amplification of surface temperature trends and variability in the tropical atmosphere. Science 309, 1551–1556. doi:10.1126/science.1114867

Santer, B.D., Wigley, T.M.L., Simmons, A.J., Kållberg, P.W., Kelly, G.A., Uppala, S.M., Ammann, C., Boyle, J.S., Brüggemann, W., Doutriaux, C., Fiorino, M., Mears, C., Meehl, G.A., Sausen, R., Taylor, K.E., Washington, W.M., Wehner, M.F., Wentz, F.J., 2004. Identification of anthropogenic climate change using a second-generation reanalysis. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 109. doi:10.1029/2004JD005075

Sarmiento, J.L., Gruber, N., 2006. Ocean Biogeochemical Dynamics. Princeton University Press, Princeton.

Schellnhuber, H.J., 2011. Geoengineering: The good, the MAD, and the sensible. Proceedings of the National Academy of Sciences 108, 20277–20278. doi:10.1073/pnas.1115966108

Scherllin-Pirscher, B., Deser, C., Ho, S.-P., Chou, C., Randel, W., Kuo, Y.-H., 2012. The vertical and spatial structure of ENSO in the upper troposphere and lower stratosphere from GPS radio occultation measurements. Geophysical Research Letters 39. doi:10.1029/2012GL053071

Scherllin-Pirscher, B., Kirchengast, G., Steiner, A.K., Kuo, Y.-H., Foelsche, U., 2011. Quantifying uncertainty in climatological fields from GPS radio occultation: An empirical-analytical error model. Atmospheric Measurement Techniques 4, 2019–2034. doi:10.5194/amt-4-2019-2011

Sherwood, S.C., Roca, R., Weckwerth, T.M., Andronova, N.G., 2010. Tropospheric water vapor, convection, and climate. Reviews of Geophysics 48. doi:10.1029/2009RG000301

Sistla, S.A., Moore, J.C., Simpson, R.T., Gough, L., Shaver, G.R., Schimel, J.P., 2013. Long-term warming restructures Arctic tundra without changing net soil carbon storage. Nature 497, 615–618. doi:10.1038/nature12129

Snyder, P.K., Delire, C., Foley, J.A., 2004. Evaluating the influence of different vegetation biomes on the global climate. Climate Dynamics 23. doi:10.1007/s00382-004-0430-0

Soden, B.J., Held, I.M., 2006. An assessment of climate feedbacks in coupled ocean–atmosphere models. Journal of Climate 19, 3354–3360. doi:10.1175/JCLI3799.1

Stanhill, G., Cohen, S., 2001. Global dimming: a review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences. Agricultural and Forest Meteorology 107, 255–278. doi:10.1016/S0168-1923(00)00241-0

Steiner, A.K., Hunt, D., Ho, S.-P., Kirchengast, G., Mannucci, A.J., Scherllin-Pirscher, B., Gleisner, H., von Engeln, A., Schmidt, T., Ao, C., Leroy, S.S., Kursinski, E.R., Foelsche, U., Gorbunov, M., Heise, S., Kuo, Y.-H., Lauritsen, K.B., Marquardt, C., Rocken, C., Schreiner, W., Sokolovskiy, S., Syndergaard, S., Wickert, J., 2013. Quantification of structural uncertainty in climate data records from GPS radio occultation. Atmospheric Chemistry and Physics 13, 1469–1484. doi:10.5194/acp-13-1469-2013

Steiner, A.K., Kirchengast, G., Lackner, B.C., Pirscher, B., Borsche, M., Foelsche, U., 2009. Atmospheric temperature change detection with GPS radio occultation 1995 to 2008. Geophysical Research Letters 36. doi:10.1029/2009GL039777

Steiner, A.K., Lackner, B.C., Ladstädter, F., Scherllin-Pirscher, B., Foelsche, U., Kirchengast, G., 2011. GPS radio occultation for climate monitoring and change detection. Radio Science 46. doi:10.1029/2010RS004614

Stroeve, J.C., Serreze, M.C., Holland, M.M., Kay, J.E., Malanik, J., Barrett, A.P., 2012. The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: a research synthesis. Climatic Change 110, 1005–1027. doi:10.1007/s10584-011-0101-1

Taylor, K.E., Stouffer, R.J., Meehl, G.A., 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design. Bulletin of the American Meteorological Society 93, 485–498. doi:10.1175/BAMS-D-11-00094.1

Tegen, I., 2003. Modeling the mineral dust aerosol cycle in the climate system. Quaternary Science Reviews 22, 1821–1834. doi:10.1016/S0277-3791(03)00163-X

Thorne, P.W., Lanzante, J.R., Peterson, T.C., Seidel, D.J., Shine, K.P., 2011. Tropospheric temperature trends: history of an ongoing controversy. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change 2, 66–88. doi:10.1002/wcc.80

Trenberth, K.E., Fasullo, J.T., 2013. An apparent hiatus in global warming? Earth's Future 1, 19–32. doi:10.1002/2013EF000165

Trenberth, K.E., Fasullo, J.T., Kiehl, J., 2009. Earth's global energy budget. Bulletin of the American Meteorological Society 90, 311–323. doi:10.1175/2008BAMS2634.1

Trenberth, K.E., Fasullo, J.T., Mackaro, J., 2011. Atmospheric moisture transports from ocean to land and global energy flows in reanalyses. Journal of Climate 24, 4907–4924. doi:10.1175/2011JCLI4171.1

Uppala, S.M., KÅllberg, P.W., Simmons, A.J., Andrae, U., Bechtold, V.D.C., Fiorino, M., Gibson, J.K., Haseler, J., Hernandez, A., Kelly, G.A., Li, X., Onogi, K., Saarinen, S., Sokka, N., Allan, R.P., Andersson, E., Arpe, K., Balmaseda, M.A., Beljaars, A.C.M., Berg, L.V.D., Bidlot, J., Bormann, N., Caires, S., Chevallier, F., Dethof, A., Dragosavac, M., Fisher, M., Fuentes, M., Hagemann, S., Hólm, E., Hoskins, B.J., Isaksen, L., Janssen, P. a. E.M., Jenne, R., Mcnally, A.P., Mahfouf, J.-F., Morcrette, J.-J., Rayner, N.A., Saunders, R.W., Simon, P., Sterl, A., Trenberth, K.E., Untch, A., Vasiljevic, D., Viterbo, P., Woollen, J., 2005. The ERA-40 re-analysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 131, 2961–3012. doi:10.1256/qj.04.176

Van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G.C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S.J., Rose, S.K., 2011. The representative concentration pathways: an overview. Climatic Change 109, 5–31. doi:10.1007/s10584-011-0148-z

Wang, Y.M., Lean, J.L., Sheeley, N.R., 2005. Modeling the Sun's magnetic field and irradiance since 1713. The Astrophysical Journal 625, 522–538. doi:10.1086/429689

Wen, M., Yang, S., Vintzileos, A., Higgins, W., Zhang, R., 2012. Impacts of model resolutions and initial conditions on predictions of the Asian summer monsoon by the NCEP climate forecast system. Weather and Forecasting 27, 629–646. doi:10.1175/WAF-D-11-00128.1

Wild, M., 2012. Enlightening global dimming and brightening. Bulletin of the American Meteorological Society 93, 27–37. doi:10.1175/BAMS-D-11-00074.1

Woodruff, S.D., Diaz, H.F., Worley, S.J., Reynolds, R.W., Lubker, S.J., 2005. Early ship observational data and ICOADS. Climatic Change 73, 169–194. doi:10.1007/s10584-005-3456-3

Wöppelmann, G., Pouvreau, N., Coulomb, A., Simon, B., Woodworth, P.L., 2008. Tide gauge datum continuity at Brest since 1711: France's longest sea-level record. Geophysical Research Letters 35, doi:10.1029/2008GL035783

Yang, X., Rosati, A., Zhang, S., Delworth, T.L., Gudgel, R.G., Zhang, R., Vecchi, G., Anderson, W., Chang, Y.-S., DelSole, T., Dixon, K., Msadek, R., Stern, W.F., Wittenberg, A., Zeng, F., 2013. A predictable AMO-like pattern in the GFDL fully coupled ensemble initialization and decadal forecasting system. Journal of Climate 26, 650–661. doi:10.1175/JCLI-D-12-00231.1

Zachos, J., Pagani, M., Sloan, L., Thomas, E., Billups, K., 2001. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. Science 292, 686–693. doi:10.1126/science.1059412

Band 1 Kapitel 2: Emissionen und Konzentrationen strahlungswirksamer atmosphärischer Spurenstoffe

Volume 1 Chapter 2: Emissions and Concentrations of Radiatively Active Atmospheric Trace Constituents

Koordinierende LeitautorInnen
Wilfried Winiwarter, Regina Hitzenberger

LeitautorInnen
Barbara Amon, Heidi Bauer†, Robert Jandl, Anne Kasper-Giebl, Gerd Mauschitz, Wolfgang Spangl, Andreas Zechmeister, Sophie Zechmeister-Boltenstern

Beiträge von
Isabella Aschauer, Wolfgang Bittermann, Thomas Brunner, Armin Hansel, Stefan Hausberger, Heide Jobstmann, Maria Purzner, Hans Puxbaum, Cornelia Schenk, Christoph Schmidl, Petra Seibert, Stana Simic

Für den Begutachtungsprozess
Wolfgang Mattes

Inhalt

ZUSAMMENFASSUNG

Strahlungswirksame atmosphärische Spurenstoffe umfassen, erstens, langlebige Treibhausgase mit einer Aufenthaltszeit in der Atmosphäre im Bereich von mehreren Jahren, welche auch Gegenstand internationaler Übereinkommen sind; zweitens kurzlebige Gase, die in atmosphärischen Reaktionen gebildet werden und Stunden bis Tage in der Atmosphäre verbleiben: vor allem Ozon; drittens Aerosole, also luftgetragene Teilchen die Strahlung im kurzwelligen Bereich des Spektrums streuen oder absorbieren (direkter Effekt) bzw. an der Wolkenbildung und der dadurch verursachten Reflexion von Sonnenlicht mitwirken (indirekter Effekt). Das vorliegende Kapitel behandelt diese unterschiedlichen Substanzen in ihrer Relevanz für Österreich. Die nationale Emissionsinventur zeigt im Fall der langlebigen Treibhausgase die große Bedeutung des Sektors Energie (79 % der treibhauswirksamen Emissionen, davon ist ein Drittel Straßenverkehr und etwa ein Viertel ist Energieeinsatz in der Industrie) vor den industriellen Prozessen (13 % der Emissionen) und der Landwirtschaft (9 % der Emissionen). Die Aufnahme von Treibhausgasen durch Biomasse in Wäldern stellt eine Senke von wenigen Prozentpunkten der Gesamtemissionen dar. Seit 1990 zeigen die Emissionen der meisten Sektoren Schwankungen, aber keine wesentlichen Trends. Eine deutliche Zunahme lässt sich nur für die energetischen Emissionen des Straßenverkehrs zeigen, die gemeinsam mit der Abnahme der Senkenfunktion von Wäldern die gesamten Treibhausgasemissionen Österreichs der letzten 20 Jahre um 19 % ansteigen lässt. Die Veränderungen der österreichischen Emissionen haben keinen merkbaren Einfluss auf die Ergebnisse der Konzentrationsmessungen der Treibhausgase Kohlendioxid und Methan, die am Sonnblick-Observatorium die globalen Entwicklungen nachzeichnen. Zusammenhänge zwischen Emissionen und Konzentrationen werden bei kurzlebigen Komponenten deutlich. Mit Maßnahmen zur Reduktion von Vorläufersubstanzen sinken die Konzentrationen von Ozon vor einem gleichbleibenden regionalen Hintergrund. Leichte Abnahmen deuten auch die Werte für Emissionen und Konzentrationen von Partikeln an, Substanzen die generell eher „kühlend" wirken. Ein solcher Trend ist zumindest im Beobachtungszeitraum (20 Jahre) für Ruß nicht zu erkennen, wobei Ruß jene Aerosolkomponente ist die klimaerwärmenden Effekte verstärkt. Untersuchungen in Österreich helfen mit, das wissenschaftliche Verständnis von Aerosol auf das Klima zu verbessern – ein Zusammenhang, der global noch zu wenig verstanden wird, aber als ähnlich bedeutend eingestuft wird wie jener der langlebigen Treibhausgase.

SUMMARY

Radiatively active atmospheric trace constituents consist of the following groups of compounds: long-lived greenhouse gases with residence times of years, subject to international conventions; short-lived gases formed in the atmosphere from precursor compounds, remaining in the atmosphere for hours or days: notably ozone; and aerosols, that is, airborne particles interacting with short-wave radiation with both direct and indirect effects. The „direct effect" covers scattering or absorption of light, while the „indirect effect" describes the particles' contribution to cloud formation and their resulting influence on reflecting sunlight. This chapter covers these quite diverse compounds with respect to their relevance for Austria. The Austrian national greenhouse gas inventory demonstrates the importance of the energy sector for emissions of the long-lived greenhouse gases. Out of the total emissions, 79 % are considered energy related (of which about one third is due to road transport, and a quarter describes energy use from industry), 13 % are derived from industrial processes, and 9 % from agriculture. Carbon uptake in forest biomass represents a sink of a few percentage points of total emissions. Variations of emissions have occurred since 1990, but no trends are seen for most sectors. A strong increase in transport emissions and a simultaneous decline of the forest sink at the same time has resulted in an overall increase of the Austrian greenhouse gas emissions of 19 % over the last 20 years. Variations in Austrian emissions do not notably affect the results of measurements at Sonnblick Observatory, where concentrations of the greenhouse gases carbon dioxide and methane reflect the global situation. A relationship between emissions and concentrations only becomes evident for short-lived compounds. Reducing the emissions of precursors helped decrease ozone concentrations while the regional background has remained constant. Furthermore, the emissions and concentrations of particles have decreased slightly over time, which in general are considered to „cool" the climate. Such a trend – at least over the past 20 years – is not apparent for black carbon (soot), a compound considered to enhance climate warming effects. Austrian research helps identify the impact of aerosols on climate – an impact generally considered as important as that of the long-lived greenhouse gases, but far too little is known on a global scale.

KERNAUSSAGEN

- Emissionsdaten der im Kyoto-Protokoll genannten Gase: Sowohl von der freigesetzten Menge als auch hinsichtlich

der Wirksamkeit ist Kohlendioxid mit etwa 85 % auch in Österreich das wichtigste Treibhausgas. Ein Großteil der nationalen Emissionen (etwa 79 % der Gesamtemissionen) erfolgt durch die energetische Nutzung von fossiler Energie, als größtem Subsektor ist davon dem Straßenverkehr mehr als ein Drittel zuzuordnen. Die Zunahme des Holzvorrats im Wald wirkt als Senke im Ausmaß von etwa 5 % der Emissionen, ist aber von Jahr zu Jahr variabel und tritt in den letzten Jahren deutlich vermindert auf. Die Emissionen von Methan (in erster Linie aufgrund von Viehzucht) und Lachgas (vor allem aufgrund des Einsatzes von Stickstoffdünger im Ackerbau) entsprechen 7 % bzw. 6 % der Gesamtemissionen (sehr hohes Vertrauen).

- Entwicklungen der Emissionen der Treibhausgasinventur seit 1990: Sektoral kam es kaum zu Veränderungen zwischen 1990 und 2010. Punktuelle Variationen sind zu beobachten, über die gesamte Periode verbleiben die Emissionen weitgehend konstant. Die für das Gesamtergebnis (Zunahme der Emissionen um 19 %) wesentlichen Ausnahmen sind der Verkehr (vor allem infolge systematischen Kraftstoffexports in Tanks von Transitfahrzeugen) sowie das weitgehende Wegfallen der Senkenfunktion der Wälder durch Sättigungseffekte der betroffenen Ökosysteme, begleitet von verbesserten forstlichen Möglichkeiten und erhöhtem Einsatz von Biomasse als Energieträger (hohes Vertrauen). Im Vergleich zu den Vereinbarungen des Kyoto-Protokolls liegen die Emissionen der Verpflichtungsperiode (2008–12) um 18,8 % über dem Emissionsziel.
- Die regionale Analyse bezeichnet besonders die Bundesländer mit großen Flächen als große Verursacher von Treibhausgasen. Aufgrund der Stahlindustrie liegt Oberösterreich an der Spitze, gefolgt von Niederösterreich, das ebenso eine hohe Bevölkerungszahl, großes Verkehrsaufkommen und wichtige thermische Kraftwerke aufweist. Oberösterreich hat auch die höchsten pro-Kopf Emissionen. Mit niedrigen pro-Kopf Emissionen kann dagegen Wien aufwarten (nur Vorarlberg liegt niedriger) – elektrische Energie und Güter werden importiert, die Mobilität erstreckt sich vielfach außerhalb des Bundeslandes. Die hohe Einwohnerdichte weist aber Wien die höchsten Treibhausgasemissionen pro Fläche zu (sehr hohes Vertrauen).
- Weitere klimarelevante Substanzen: Global bewirken Ozon und chlorierte Kohlenwasserstoffe (deren weitere Produktion als Zerstörer der Ozonschicht bereits im Montreal-Protokoll verboten wurde) je ein Zehntel der anthropogenen Beiträge zur Strahlungsbilanz (hohes Vertrauen), Aerosole könnten etwa die Hälfte des anthropogenen Treibhauseffektes kompensieren (geringes Vertrauen), wobei Ruß wiederum eine klimaerwärmende Wirkung ausübt. Daten über Emissionen bzw. die atmosphärische Bildung von Ruß, anderen Aerosolen und Ozon sind für Österreich verfügbar. Diese Substanzen sind Gegenstand intensiver wissenschaftlicher Forschung mit wichtigen österreichischen Beiträgen.
- Die Rolle von Aerosolen in Wolken: Österreichische Studien über atmosphärische Aerosole und ihrer Aufnahme in Wolken zeigen, dass das Strahlungsverhalten von Wolken durch die Aufnahme von Ruß deutlich beeinflusst werden kann. Ruß wird zwar weniger effizient als Sulfat in Wolkentröpfchen aufgenommen, seine Strahlungseigenschaften werden in der Wolke jedoch verstärkt. Dennoch ist weiter davon auszugehen, dass die „indirekten" Klimaeffekte der Wolkenbildung eher zu einer Abkühlung als zu einer Erwärmung auch unter Verhältnissen verschmutzter Luftmassen führen (geringes Vertrauen).
- Konzentrationsmessungen: Kontinuierliche Messungen von Treibhausgasen in Österreich zeigen Muster, die mit internationalen Daten sehr gut übereinstimmen (sehr hohes Vertrauen). Vom Sonnblick gibt es seit 1999 Datenreihen zu den Konzentrationen von Kohlendioxid mit bekanntem jahreszeitlichen Muster (Winter ca. 15 ppm höher als Sommer) und steigendem Trend (ca. 2,5 ppm Zunahme pro Jahr, Maxima derzeit knapp unter 400 ppm). Auch Methan (seit 2012) und die Ozon-Gesamtsäule (kumulierte Konzentrationen über alle atmosphärischen Schichten), die seit Messbeginn 1994 eher zu- als abnimmt, werden am Sonnblick bestimmt.

2.1 Relevante Substanzen und Systemgrenzen
2.1 Relevant compounds and system boundaries

Das vorliegende Kapitel gibt einen Überblick über den Wissensstand zu Emission und Konzentration klimarelevanter Spurenstoffe (d. h. Gase und Aerosolpartikel) in Österreich. Zunächst wird die Freisetzung der im Kyoto-Protokoll[1] explizit genannten Gase betrachtet, das sind neben Kohlendioxid (CO_2) Methan (CH_4) und Lachgas (N_2O) sowie die Gruppe

[1] Das Kyoto Protokoll im Rahmen der UN Rahmenkonvention für Klimawandel verpflichtete alle teilnehmenden Industrieländer, ihre THG-Emissionen zwischen Basisjahr (1990) und der Zielperiode (2008–2012) zu begrenzen.

der fluorierten Verbindungen („F-Gase“). Letztere setzt sich zusammen aus den vollfluorierten Kohlenwasserstoff-Verbindungen (perfluorinated carbons, PFCs), den teilfluorierten Verbindungen (hydrofluorocarbons, HFCs) und Schwefelhexafluorid (SF_6). Die natürlichen biogeochemischen Kreisläufe von CO_2, CH_4 und N_2O können als konstanter „Hintergrund“ gelten, der nicht berücksichtigt werden muss.

Um die Klimawirksamkeit dieser Gase vergleichbar machen zu können, hat sich die Verwendung eines Parameters durchgesetzt, der die globale Klimawirksamkeit einer Substanz über 100 Jahre im Verhältnis zu CO_2 wiedergibt und so erlaubt, in CO_2-Äquivalenten zu rechnen. Dieses Erwärmungspotential („global warming potential“, GWP) ist für CO_2 definitionsgemäß 1. In diesem Kapitel werden gemäß IPCC (1997) Werte von 21 für CH_4 (d. h., 1 kg CH_4 wirkt so stark wie 21 kg CO_2), 310 für N_2O und je nach fluorierter Verbindung zwischen 140 und 23 900 verwendet, wie sie auch in die verpflichtenden Emissionsberichte an die UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) Eingang finden (Umweltbundesamt, 2012c). Diese Zahlen unterscheiden sich von jenen des 5. Sachstandsberichts des Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC (siehe Band 1, Kapitel 1), welche erstmals unter konsistenter Berücksichtigung indirekter atmosphärischer Effekte erstellt wurden, aber in den internationalen Vereinbarungen und Vergleichen noch keine Rolle spielen.

Die Erfassung der Emissionen folgt der Definition der Quellgruppen des IPCC (IPCC, 1997; IPCC, 2006). Um Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) verlässlich abbilden zu können, sind diese Quellgruppen so gestaltet, dass sie eine möglichst direkte Verknüpfung zwischen Emissionsprozess und leicht verfügbaren statistischen Informationen ermöglichen. Für die Abschätzung von CO_2 aus Verbrennungsprozessen bilden nationale Energiestatistiken eine wesentliche Grundlage. Dies betrifft insbesondere die fossilen Energieträger; die CO_2-Emissionen aus biogenen Brennstoffen gelten über die Kohlenstoffbilanz der Landnutzung (siehe unten) als erfasst. Die IPCC Definition nutzt die Tatsache, dass nationale Energiestatistiken im Rahmen der IEA (International Energy Agency) international akkordiert werden. So können auch Trends der zukünftigen Entwicklung ermittelt werden (z. B. World Energy Outlook, WEO), was wiederum für die Konsistenz von Energie- und THG-Projektionen relevant ist. Akkordiert erfolgt auch die Unterscheidung zwischen energetischem Einsatz und stofflichem Einsatz fossiler Energieträger. Konkret wird im Hochofenprozess die Umwandlung von Koks zu Gichtgas (das hauptsächlich aus Kohlenmonoxid besteht) als energetische Umwandlung definiert, die Verwendung dieses Gichtgases als Reduktionsmittel von Eisenerz, die es zu CO_2 umwandelt, jedoch als stoffliche Umwandlung. Emissionen von Substanzen im Rahmen solcher stofflichen Veränderungen lassen sich im Wesentlichen auf Basis von Industriestatistiken quantifizieren.

Weitere relevante Quellgruppen sind die Freisetzung strahlungsaktiver Substanzen bei ihrer Verwendung (z. B. Gase oder verdampfende flüssige Lösungsmittel), sowie die Landwirtschaft mit ihren beträchtlichen Emissionen an CH_4 und N_2O. Gesondert betrachtet werden die Veränderungen des Kohlenstoff-Pools in Böden und pflanzlicher Biomasse, die durch Landnutzung bzw. Landnutzungsänderung bedingt sind und eine Aussage darüber geben, wie stark atmosphärisches CO_2 von Biomasse eingebunden oder (etwa infolge von Verbrennung) freigesetzt wird. Gemäß der IPCC Anleitung wird der Sektor Abfallbehandlung getrennt angeführt.

Die Verwendung der IPCC Quellgruppen in diesem Kapitel ermöglicht eine sehr gute Definition der Systemgrenzen und vermeidet Doppelzählungen oder ein „Übersehen“ von anthropogenen Emissionen. Auch werden internationale Vergleiche wesentlich erleichtert. Ziel dabei ist es, nationale Emissionen mit möglichst hoher Qualität erfassen zu können. Allerdings erlaubt es die Konzentration auf die Energiestatistiken nicht immer, konkrete Wirtschaftssektoren als Verursacher zu benennen. Noch schwieriger ist es, die Konsequenzen bestimmter Handlungsmuster mit den dadurch verursachten THG-Emissionen in Verbindung zu bringen. Analysen solcher Prozessketten (etwa nach Art eines „Produkt-Fußabdrucks“) unterbleiben daher in diesem Kapitel, auch weil solche Analysen durch eine willkürliche Auswahl von Systemgrenzen zu scheinbar widersprüchlichen Ergebnissen kommen können, welche nur sehr schwer aufgelöst und korrekt bewertet werden können.

Nicht in die Regulierungen des Kyoto-Protokolls eingebunden sind Partikel, die in der Atmosphäre als Aerosole (in der Luft suspendierte Partikel) vorliegen. Insbesondere können Rußteilchen und andere Strahlung absorbierende Partikel (oft aus Verbrennung von Biomasse) zur Erhöhung der Temperatur beitragen, während andere, insbesondere wasserlösliche Partikel, die als Kondensationskerne für Wolkentröpfchen dienen, einen kühlenden Effekt haben (siehe Band 1, Kapitel 1). Viele dieser Partikel bestehen aus bzw. enthalten Sulfate und Nitrate, die erst in der Atmosphäre als Reaktionsprodukte von Luftschadstoffen (Schwefeldioxid, SO_2, bzw. Stickoxide, NO_x) entstehen, die aber selbst kein THG sind. Analog wird Ozon, ein klimawirksames Gas, in relevanten Mengen nicht direkt freigesetzt, sondern in der Atmosphäre gebildet (indirekte Effekte von Emissionen). Konzentrationen von Ozon

und Partikeln werden routinemäßig weniger wegen ihrer Klimawirksamkeit, sondern vor allem wegen ihrer lokal relevanten schädigenden Wirkungen erfasst. Die Einflüsse von Aerosolen auf das Klima sind wegen der komplexen Prozesse und Wechselwirkungen ein weltweit intensiv beforschtes Gebiet (IPCC, 2013).

Die Gruppe der Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffverbindungen (FCKW) ist ebenfalls als THG relevant, wird hier aber nicht betrachtet. Deren Emission ist im letzten Jahrzehnt deutlich zurückgegangen, besonders in Industrieländern wie Österreich, da ihre Verwendung wegen ihrer Eigenschaft als Zerstörer der stratosphärischen Ozonschicht im Montreal-Protokoll verboten wurde. Ihr Beitrag zum Treibhauseffekt ist zwar geringer als jener von Methan (IPCC, 2013), wird jedoch aufgrund der geringen Abbaurate noch über Jahrzehnte anhalten, auch wenn es keine Emissionen mehr geben wird. Es gibt also weiterhin eine globale Wirkung, aber praktisch keinen nationalen Bezug mehr.

Aus den für Österreich ermittelten Emissionen lassen sich kaum Aussagen auf konkrete Klimawirkungen ziehen, die von Österreich verursacht werden, auch nicht auf direkte Auswirkungen auf Österreich. Klimawirksame Substanzen werden im Rahmen von atmosphärischen Transportprozessen weiträumig verfrachtet und wirken aufgrund ihrer hohen atmosphärischen Lebensdauer auf einer globalen Skala. Dies gilt, wenngleich weniger deutlich, auch für die kurzlebigeren klimawirksamen Substanzen (Partikel, Ozon).

Die Schwierigkeit der Beachtung nationaler Grenzen kann in ganz anderen Zusammenhängen relevant werden, wenn sie nämlich die erwähnten Systemgrenzen betreffen bzw. diese unscharf und interpretierbar gestalten:

- Export von (später) klimarelevanten Substanzen: Gemäß Kyoto-Protokoll sind durch Energieträger verursachte Emissionen dem Staat zuzuordnen, in dem diese Energieträger in den Verkauf treten und somit statistisch erfasst werden. Da Österreich große Mengen an Treibstoffen (fast 30 % des Umsatzes) in Fahrzeugtanks exportiert („Tanktourismus“), werden beträchtliche Mengen von THG Österreich zugeordnet, die mit der nationalen Wirtschaftsleistung nur teilweise im Zusammenhang stehen.
- Umgekehrt werden zahlreiche Güter nach Österreich importiert und hier verwendet, deren Produktion im Ausland THG-Emissionen verursacht. Gemäß Kyoto-Protokoll erfolgt die Wirtschaftsleistung und somit die Zuordnung der Emissionen in den Produktionsländern. Man kann aber argumentieren, dass diese Emissionen durch den österreichischen Bedarf erfolgen und als Prozessketten Berücksichtigung finden sollten. Maßnahmen am Ende einer solchen Kette, also in Österreich, hätten demgemäß Auswirkungen auf den Ursprung, unabhängig von den dazwischen liegenden Staatsgrenzen.
- Wenn unterschiedliche Ambitionen oder Gesetzgebung zwischen Staaten eine Verschiebung anstatt einer Reduktion von THG bewirkt, etwa indem Produktion aus einem Land, welches den Emissionsreduktionen nach Kyoto unterworfen ist, in ein Entwicklungsland ausgelagert wird, spricht man von „carbon leakage“ (auch wenn die Emissionen andere klimarelevante Substanzen als CO_2 betreffen).
- Gemeinsame Anstrengungen verschiedener Staaten zur gesamthaften Minderung von Emissionen sind als Mechanismen im Kyoto-Protokoll festgelegt und ermöglichen es im Rahmen des „Clean Development Mechanism“ (CDM), dass etwa Industrieländer durch Investitionen in Entwicklungsländern Emissionsreduktionen kostengünstiger durchführen können als es im eigenen Land möglich wäre. Hier gibt es sehr erfolgreiche Beispiele, aber auch Fälle, in denen der Mechanismus selbst Emissionen hervorruft bzw. verstärkt, die dann durch die Investitionen vermindert werden (F-Gase: Wara, 2007). Auch bei Emissionseinsparungen, die schwer exakt quantifiziert werden können (Landnutzungsänderungen) gibt es sehr großen Diskussionsbedarf zur korrekten Bewertung von Minderungsmaßnahmen (z. B. REDD, REDD+: „Reducing Emissions from Deforestation and Degradation“). Finanzielle Unterstützung von Maßnahmen sollte korrekterweise nur dort die Anrechnung von Emissionsminderungen erlauben, wo diese Minderung nicht ohnehin eintritt. Dies zu gewährleisten ist Aufgabe von UNFCCC. Es bestehen aber Interessen von Käufern und Verkäufern von Emissionszertifikaten, sehr kostengünstige Modelle zu ermöglichen, in denen die Sicherstellung von tatsächlichen Minderungen vielleicht weniger Priorität hat, als es für die Klimasituation insgesamt erforderlich wäre.

Insgesamt verursachen diese grenzüberschreitenden Aspekte der THG-Emissionen zusätzliche Komplikationen, was das Auffinden von Lösungen deutlich erschwert. Eine detaillierte Betrachtung dieser Problematik würde den Rahmen dieses Kapitels sprengen. Einige Überlegungen, insbesondere in Hinblick auf Möglichkeiten von Emissionsminderungen, werden in Band 3 dieses Berichtes behandelt.

2.2 Emissionen von Treibhausgasen und Partikeln
2.2 Emissions of greenhouse gases and of particulate matter

2.2.1 Die österreichische Treibhausgasinventur im Überblick

Österreich setzte im Jahr 2010 THG im Ausmaß von fast 81 000 kt CO_2-Äq. frei, das sind etwa 0,17 % der weltweiten Emissionen. Zum Vergleich: Österreich bedeckt 0,056 % der globalen Landfläche und stellt 0,12 % der globalen Bevölkerung. Rechnet man die Emissionen auf pro-Kopf-Emissionen um, so liegen diese mit 9,7 t CO_2-Äq. / Kopf / Jahr etwas über dem EU-Schnitt von 8,8 t und deutlich über jenen der Schweiz mit 6,9 t, jedoch deutlich unter jenen der USA (18,4 t CO_2-Äq. / Kopf und Jahr) oder Russlands (11 t CO_2-Äq. / Kopf / Jahr). In dieser Auswertung wurden die direkten Emissionen um die Kohlenstoffsenken der Biosphäre korrigiert („mit Nettoemissionen von LULUCF [Land use, land-use change and forestry]"). Die Daten sind den offiziellen nationalen Berichten an die UNFCCC entnommen (für Österreich: Umweltbundesamt, 2012c) und wie die anderen folgenden Angaben detailliert im Tabellenanhang angeführt.

Den Verlauf der nationalen THG-Emissionen zeigt Abbildung 2.1 gegliedert nach den Sektoren der offiziellen internationalen Emissionsberichte. Dabei wird deutlich, dass die Emissionen 2010 tatsächlich um fast 19 % über den Werten des Basisjahres 1990 lagen. Um die Trends besser aufzuschlüsseln, wurden beim weitaus bedeutendsten Sektor, den Emissionen aus der Verwendung fossiler Energie, die transportbedingten Emissionen gesondert ausgewertet.

Insgesamt zeigt sich, dass die Emissionen der einzelnen Sektoren sehr stabil sind. Manche Sondereffekte führen zu Schwankungen in einzelnen Jahren (etwa wetterbedingte Veränderungen im Bedarf an Heizenergie oder konjunkturelle Variationen, die in einem Minimum im Jahr 2009 sichtbar werden). Eventuell erfolgte Emissionsreduktionen werden nicht sichtbar, da sie offenbar durch Ausweitung der relevanten Aktivitäten kompensiert werden. Nur im eher kleinen Sektor „Abfall" können deutliche Reduktionen der Emissionen im relevanten Zeitraum beobachtet werden.

Die wesentlichen Veränderungen, welche für die Gesamtsumme der Emissionen wirksam werden, sind aber Zunahmen. Konkret sind hier zwei Elemente zu nennen, die in weiterer Folge dieses Kapitels näher behandelt werden. Deutliche Zunahmen der Emissionen treten im Transport auf, die nicht (nur) auf die Zunahme des Verkehrs zurückzuführen sind, sondern durch Preisdifferenzen der Treibstoffe zwischen Österreich und den wichtigsten Nachbarländern bewirkt werden, die sich erst im Laufe der Periode aufgrund unterschiedlicher Besteuerung ausbildeten und zum „Tanktourismus" führten. Gleichzeitig verlieren die in den 1990er Jahren aktiven Kohlenstoffsenken ihre Wirksamkeit, da Biomasse im Wald aufgrund verbesserter forstlicher Nutzung nicht weiter akkumuliert.

Die nationalen Verpflichtungen Österreichs nach dem Kyoto-Protokoll lassen sich – geringfügig vereinfacht – wie

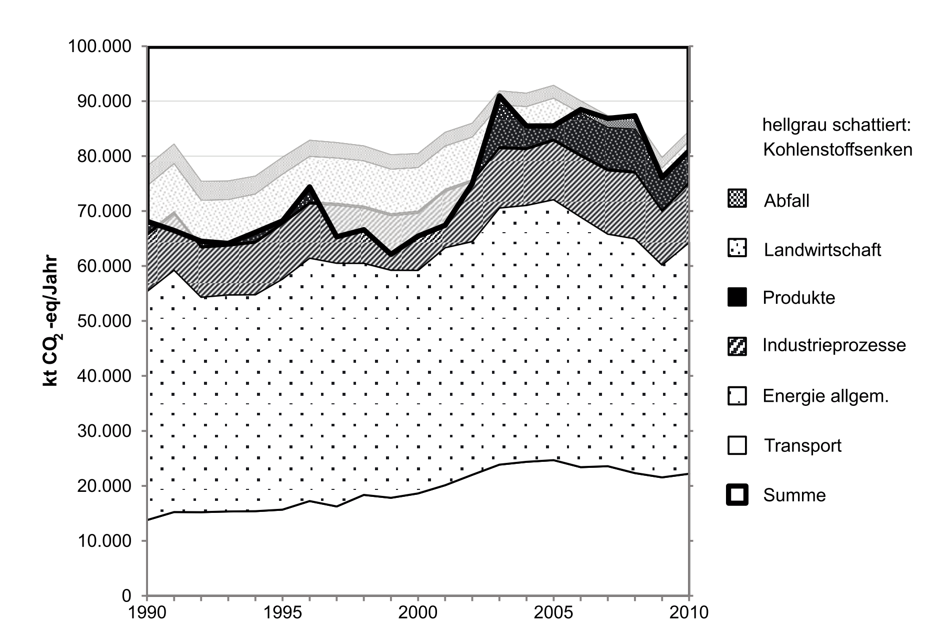


Abbildung 2.1 Offiziell berichtete THG-Emissionen Österreichs nach IPCC Quellsektoren mit gesonderter Ausweisung der Emissionen des Verkehrs (Umweltbundesamt, 2012c). Die mit breiter Linie dargestellte 'Summe' liegt unterhalb der Maximalwerte, von denen jeweils die 'Kohlenstoffsenken' abgezogen wurden (hier hellgrau schattiert dargestellt)

Figure 2.1 Austrian greenhouse gas emissions according to IPCC source sectors as officially reported (Umweltbundesamt, 2012c). Transport emissions are provided separately. The bold line representing the sum of all sectors considers overall emission reductions by carbon sinks, thus is lower than the total (represented in light grey shades)

folgt darstellen: Österreich stimmte der Reduktion der THG-Emissionen (gerechnet ohne die Berücksichtigung der Kohlenstoffsenken, also „ohne LULUCF" – siehe Tabelle 2.A.1 im Anhang) um 13 % zwischen 1990 und der Zielperiode (Mittelwert 2008–2012) zu. Der Zielwert von 68 773 Gg CO_2-Äq. ist also den tatsächlichen mittleren Emissionen der Zielperiode – im Mittel 83 051 Gg CO_2-Äq. (Umweltbundesamt, 2014) – gegenüberzustellen, von denen jedoch ein Teil der Kohlenstoffsenken, nämlich die zusätzlich neu aufgeforsteten Wälder, in Höhe von im Mittel 1 360 Gg CO_2-Äq. / Jahr in Abzug gebracht werden durften. Die resultierenden Emissionen von 81 691 Gg CO_2-Äq. lagen um 18,8 % über dem Kyoto-Ziel. Zur Erfüllung der sich daraus ergebenden Verpflichtung (sowie jener, die aus der Zuteilung von Emissionszertifikaten an Industriebetriebe entstanden, die nicht verwendet, sondern dem Emissionshandel zugeführt wurden) nutzte Österreich die „flexiblen Mechanismen" des Kyoto Protokolls (siehe Band 3 Kapitel 1).

Unter den relevanten Gasen nimmt CO_2 den größten Anteil ein (ca. 85 %), CH_4 und N_2O sind, umgerechnet auf das jeweilige Treibhauspotential, ähnlich wirksam (6,9 % bzw. 6,4 %). Alle F-Gase zusammen tragen weniger als 2 % bei. Damit liegen die CH_4-Emissionen etwa halb so hoch wie im globalen Schnitt, die N_2O-Emissionen dagegen sind ähnlich. Während in Österreich Landnutzungsänderungen eine Senke darstellen, ist dies global weiterhin eine bedeutende Quelle von CO_2 – die Gewinnung großer landwirtschaftlicher Flächen aus Wäldern, die THG freisetzt, erfolgte hierzulande schon seit dem Mittelalter.

Betrachtet man die Emissionen nach Bundesland, so liegen die flächenmäßig großen Länder Ober- und Niederösterreich an der Spitze, gefolgt von der Steiermark. Das Bild wird noch deutlicher bei einer bevölkerungsbezogenen Auswertung (reine Emissionen, also ohne Berücksichtigung der biogenen Senken), wo Oberösterreich mit 16,4 t CO_2-Äq. / Kopf / Jahr etwa drei Mal so hoch liegt wie Wien oder Vorarlberg. Die Ursachen für diese Unterschiede sind strukturell, mit emissionsintensiven Betrieben (insbesondere Hochöfen und Zementproduktion) in den genannten Bundesländern, die auf langen Autobahnstrecken auch beträchtliche Teile des Gesamtverkehrs aufnehmen. Im großstädtischen Bereich Wiens mindern verdichtete Wohnstrukturen den Bedarf an Heizenergie. Auch die wesentlichen thermischen Kraftwerke Österreichs liegen in Niederösterreich, Oberösterreich und der Steiermark. Damit wird auch ein „carbon leakage" im regionalen Bereich sichtbar.

Hinter all diesen Zahlen stehen komplizierte Berechnungsvorgaben, die in den letzten Jahren international zunehmend normiert werden, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten (IPCC, 1997; 2006). Dementsprechend hat Österreich auch eine Reihe von europäischen und internationalen Berichtspflichten, die im Wesentlichen vom Umweltbundesamt (2012a; 2012c) wahrgenommen werden. Die Verwendung internationaler Normen erfordert eine entsprechende Anpassung der nationalen Statistiken und Berechnungen, etwa der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung. Näheres dazu und zu den Problemen der Erhebung und Zuordnung von Emissionen findet sich in den folgenden Abschnitten.

2.2.2 Fossile Energieträger als Emissionsquelle

Die Nutzung fossiler Energieträger verursacht einen bedeutenden Teil der nationalen THG-Emissionen. Aus dem Kohlenstoff der Brennstoffe entsteht bei ihrer Verbrennung CO_2. Die Menge an benötigten Energieträgern wird statistisch mit Hilfe von Energiebilanzen festgehalten. Die ursprüngliche Aufgabe der Energiebilanzen war es, die Situation der österreichischen Energieversorgung mit einer für politische Grundsatzentscheidungen notwendigen Genauigkeit und Rechtzeitigkeit abzubilden und die Rolle der Energieversorgung in der österreichischen Volkswirtschaft (relevant für die volkswirtschaftliche Gesamtrechnung, VGR) darzustellen. Heute dienen sie darüber hinaus dazu, die internationalen Verpflichtungen Österreichs etwa zur Lagerhaltung von Energieträgern, zur Erreichung des festgelegten Anteils von 34 % an erneuerbaren Energieträgern bis 2020 (Richtlinie 2009/28/EG zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen) sowie die Auswirkungen von Fördermaßnahmen (z. B. Förderungen von Solarenergie in Salzburg, Richtlinie 2004/8/EG zu Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen) und politischen Lenkungsmaßnahmen (z. B. Ökostromgesetz) in einem hohen Detaillierungsgrad zu dokumentieren. Des Weiteren sind sie eine Grundlage für die Berechnung der energiebasierten THG-Emissionen Österreichs (Referenzanalyse nach den Berichtspflichten des Kyoto Protokolls) durch das Umweltbundesamt, die Internationale Energieagentur (IEA) und die EU-Kommission.

Die Energiebilanzen werden derzeit ausschließlich im Internet publiziert (Statistik Austria, 2012). Dabei wird die Österreichbilanz auf Energieträgerebene für die gesamte Zeitreihe seit 1970 zur Verfügung gestellt. Die Daten werden von einer detaillierten Beschreibung von Annahmen und Methoden begleitet. Vorrangiges Ziel der seit dem Berichtsjahr 1970 erstellten Energiebilanzen ist es, das Aufkommen und den Einsatz aller in Österreich innerhalb eines Kalenderjahres eingesetzten Energieträger und alle damit verbundenen Flüsse in physikalischen (z. B. Tonnen, oder 1 000 Kubikmeter)

und energetischen Einheiten (Megawattstunden, Terajoule) konsistent darzustellen. Die Statistik Austria erstellt seit dem Berichtsjahr 1988 eigene Bundesländerenergiebilanzen, um dem Umweltbundesamt Grundlagendaten zur Berechnung von Bundesländer-Inventuren (Umweltbundesamt, 2011b) zur Verfügung zu stellen.

Im Jahr 1997 wurden das Format und die Energieträgerdefinitionen an die internationalen Formate und Definitionen, die das statistische Amt der EU-Kommission (Eurostat) und die IEA benutzen, angeglichen. Damit ist die internationale Vergleichbarkeit der österreichischen Energiebilanzen und infolge der Qualitätskontrollen der internationalen Organisationen auch die Qualität der nationalen Bilanzen garantiert. Dabei wurde bewusst in Kauf genommen, dass durch diese Anpassung die sektorale Gliederung des energetischen Endverbrauchs nicht mit der Gliederung der VGR übereinstimmt. Im Bestreben auf Datenkonsistenz wurde die gesamte Zeitreihe dem internationalen Standard entsprechend bis 1970 zurück neu berechnet.

Allerdings folgt das den Energiebilanzen zugrunde liegende Konzept auch nicht zur Gänze einem rein technischen Ansatz. Insbesondere werden Raum- und Prozesswärme nicht als Energieträger sondern als Nutzenergiekategorien definiert. Das daraus resultierende ökonomisch orientierte Konzept führt bei der Betrachtung der Wärmeproduktion zu einer Ungleichbehandlung von Energieversorgungsunternehmen (der Energieträgereinsatz zur Wärmeproduktion ist Umwandlungseinsatz, da die Wärme weiterverkauft wird) und allen übrigen Wärmeproduzenten (Energieträgereinsatz zur Wärmeproduktion ist energetischer Endverbrauch, da die Wärme selbst genutzt wird).

Die Emissionen von CO_2 ergeben sich unter Verwendung der Daten der Energiebilanz direkt aus dem bekannten Kohlenstoffgehalt des Brennstoffes. Da der Kohlenstoffgehalt (für je eine bestimmte Brennstoffart) besser mit den verwendeten energetischen Basisgrößen als mit den physikalischen Einheiten korreliert, in denen die Flüsse der Energieträger konsistent dargestellt werden, ermöglicht diese Vorgangsweise sehr zuverlässige Ergebnisse für die Referenzanalyse (Umweltbundesamt, 2012a).

Während die Energiebilanz den Rahmen für die Referenzanalyse vorgibt, erfolgen parallel sektorale Bestimmungen der Emissionen unter Anpassung der sektoralen Gliederung des Endverbrauches an die Kategorien des IPCC. Von den fast 63 100 kt CO_2-Emissionen des Jahres 2010 (immerhin 78 % der gesamten THG-Emissionen des Landes) entfallen mehr als 22 % auf energetische Umwandlung (Kraftwerke, Raffinerie, Kokerei) und fast 25 % auf die energetische Verwendung in der Industrie. Raumwärmeerzeugung trägt etwa 17 % zu den Emissionen dieser Kategorie bei, der größere Teil (12 % der energetischen Emissionen) davon in Haushalten. Der größte Teil der übrigen Emissionen (über 35 %) sind Emissionen durch den Verkehr. Auch Emissionen anderer Gase (N_2O und CH_4) werden aus den Energiedaten ermittelt, sie sind jedoch nicht bedeutend (jeweils im Bereich von 1 % der CO_2-Emissionen, auf ihre THG-Wirkung umgerechnet – der gesamte Sektor umfasst damit etwa 79 % der THG-Emissionen Österreichs).

2.2.3 Emissionsberechnung für den Sektor Verkehr

Im Sektor Verkehr werden eigene Modelle basierend auf Fahr- und Transportleistungen angewendet. Für die österreichische Emissionsinventur werden neben diesen Fahrleistungen der Energieverbrauch und die Emissionen auf Straßen sowie von mobilen Maschinen und Geräten („Off-Road Sektor") jährlich berechnet. Dafür werden die Modelle GLOBEMI und NEMO (Straßenverkehr) und GEORG (Off-Road) verwendet (siehe z. B. Schwingshackl und Hausberger, 2011). Die aus den Verkehrsmodellen gewonnenen Inlandsfahrleistungen werden anschließend mit statistischen Stichproben von Verkehrszählstellen, Fahr- und Transportleistungen kalibriert. Mit denselben Modellen werden auch Szenarien für die zukünftige Entwicklung berechnet (z. B. Hausberger und Schwingshackl, 2011). Die Kraftfahrzeuge (Kfz) und Maschinen werden detailliert nach Antriebsart, Kraftstoff, Größe, Motorleistung und Jahr der Erstzulassung getrennt simuliert. Sondereinflüsse wie z. B. Kalt- und Kühlstarts, Kraftstoffverdunstung und Fahrbahnsteigungen werden berücksichtigt. Verbrauchs- und Emissionswerte kommen aus internationalen Kooperationen, in denen Messdaten EU-weit gesammelt und verarbeitet werden (z. B. Knörr et al., 2011; Luz et al., 2010). Damit ist der Verkehrssektor vergleichsweise genau erfasst. Im Off-Road Bereich ist die Genauigkeit deutlich geringer. Hier sind die Bestandsdaten sehr unsicher, da viele Maschinen keine Zulassung benötigen. Die Einsatzzeiten der Maschinen stammen aus Befragungen mit geringem Stichprobenumfang und gemessene Emissionswerte an den Motoren dieser Maschinen sind kaum verfügbar.

Bei der Ermittlung von Energieverbrauch und Emissionen wird der Inlandsverbrauch aus den Fahrleistungen innerhalb der Staatsgrenzen Österreichs berechnet. Die Differenz dieser berechneten Energiemenge zur in Österreich verkauften Menge an Kraftstoffen wird als „Kraftstoffexport in Kfz" definiert. Da sowohl ausländischer Kraftstoff in Österreich als auch öster-

reichischer Kraftstoff im Ausland verbraucht wird, gibt „Kraftstoffexport in Kfz" somit die Summe dieser beiden Mengen an. Diese Summe war in den letzten Jahren immer deutlich positiv (mehr Export als Import), kann aber, wie in den 1990er Jahren, auch negativ (mehr Import als Export) sein.

Im Verkehrssektor ist CO_2 das dominante THG. CH_4 und N_2O entstehen als unerwünschte Verbrennungsprodukte, allerdings in geringem Umfang. Bezogen auf alle Verkehrsquellen betrug der Anteil von N_2O etwa 1,5 % und von CH_4 nur ca. 0,1 % an den österreichischen THG-Emissionen des Verkehrs im Jahr 2010 (Abbildung 2.2). Die N_2O-Emissionen werden allerdings bei üblichen Messabläufen auf den Motor- und Fahrzeugprüfständen nicht erfasst und sind nur an einer kleinen Stichprobe mit gemessen (z. B. Boulter et al., 2007). Dennoch erscheint die eher geringe Bedeutung von N_2O aus motorischen Verbrennungsprozessen relativ sicher. Frühere, deutlich höhere Emissionsfaktoren, dürften auf Artefakte in der Messkette zurückzuführen sein, da sich N_2O unter Beisein von NO_x, SO_2 und H_2O in der Probe nachbildet (Zellner et al., 2011). Diese Komponenten sind im Fahrzeugabgas praktisch immer vorhanden. Derzeit werden N_2O Bildungsmechanismen in modernen Abgasnachbehandlungssystemen diskutiert und auch messtechnisch untersucht. Die bisher spärlich vorliegenden Daten lassen aber auf keine erheblichen N_2O Bildungen schließen. Neben den gasförmigen Emissionen ist der Verkehrsbereich auch für Aerosolemissionen (siehe Abschnitt 2.2.9) sowie die Emission von Vorläufersubstanzen sekundärer Partikel (NO_x, siehe Abschnitt 2.3.2) verantwortlich.

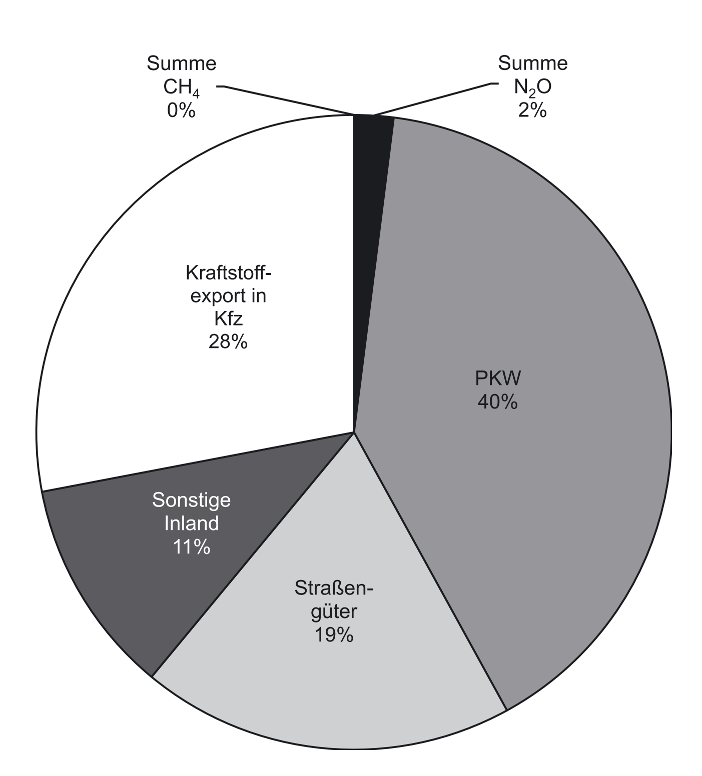


Abbildung 2.2 THG-Emissionen von Straßenverkehr und mobilen Maschinen im Jahr 2010 (ohne Luftverkehr, nach Schwingshackl und Hausberger, 2011) in CO_2-Äquivalenten

Figure 2.2 Greenhouse gas emissions of road traffic and mobile machinery in 2010 (without air traffic) as CO_2-equivalents (Schwingshackl and Hausberger, 2011)

Von den CO_2-Emissionen, die durch die in Österreich verkauften Kraftstoffe verursacht werden, werden fast 30 % dem Kraftstoffexport in Kfz zugeordnet. Davon entfallen etwa 2 / 3 auf den Straßengüterfernverkehr, der mit den großen Tankvolumina und langen Strecken ein hohes Potenzial besitzt Kraftstoff im Ausland zu verbrauchen. Da die Kraftstoffpreise in Österreich seit 1999 unter denen der wesentlichsten Nachbarländer (Deutschland, Italien) liegen, ist der Kraftstoffexport auch seit dieser Zeit auffällig steigend (Molitor et al., 2009).

Für die zukünftige Entwicklung von Energieverbrauch und THG-Emissionen (siehe dazu insbesondere Band 3, Kapitel 3) sind viele Randbedingungen relevant. Wichtige Einflussgrößen sind:

- wirtschaftliche Entwicklung und Kraftstoffpreise im In- und Ausland;
- Emissionsgrenzwerte, speziell für CO_2 (derzeit für PKW und leichte Nutzfahrzeuge definiert);
- Testverfahren zur Überprüfung der Emissionsgrenzwerte (Vermeidung von Optimierungen, die in der Typprüfung deutlich mehr Wirkung zeigen als im realen Verkehr);
- Tempo der technologischen Entwicklung von Antrieben und Kfz;
- weitere (politisch gesetzte) Maßnahmen.

Der hier verwendeten IPCC Systematik folgend sind die Emissionen des grenzüberschreitenden Flug- und Schiffsverkehrs nicht enthalten, da sie nicht eindeutig einem Land zugordnet werden können. Während letztere für Österreich unbedeutend sind, betragen die CO_2 Emissionen, die sich aus den in Österreich für internationalen Verkehr abgegebenen Mengen an Kerosin („International bunkers") ergeben, 2 050 kt CO_2, also fast ein Zehntel der Emissionen des Straßenverkehrs, und haben sich seit 1990 von 886 kt mehr als verdoppelt (Umweltbundesamt, 2012c).

2.2.4 Emissionen aus industriellen Prozessen

Eisen und Stahlproduktion: Die Herstellung von Eisen und Stahl aus Eisenerz ist in Österreich nicht nur von großer ökonomischer Bedeutung, sondern auch eine relevante Quelle

von THG. Da die entsprechenden energetischen Emissionen (die bei Verbrennungsprozessen auftreten) bereits im Sektor Energie ausgewiesen werden, werden hier lediglich die prozessbedingten Emissionen diskutiert. Dies beinhaltet auch den stofflichen Einsatz von Substanzen, die als Energieträger verwendet werden – im konkreten Fall von Kohle und Koks. Dabei wird jene Menge an Koks (genauer: aus daraus gewonnenem Kohlenmonoxid), mit dem Eisenerz zu Roheisen reduziert wird, dem Prozess zugeordnet, die Menge, die der Wärme- und Energiegewinnung dient (dabei auch die Umsetzung von Koks zu Kohlenmonoxid) gilt als energetische Emission. In der Berechnung werden demgemäß 56 % des eingesetzten Koks als prozessbedingt angesehen, entsprechend erfolgt auch die Aufteilung der Emissionen (Umweltbundesamt, 2012c). Mit 5 460 kt CO_2 (2010) umfassen die prozessbedingten Emissionen der Eisen-und Stahlproduktion etwa 6,5 % der österreichischen THG-Emissionen. Unter Berücksichtigung auch der energetischen Emissionen trägt allein der größte Standort in Linz (laut Umwelterklärung 2012 der voestalpine) mit 8 540 kt CO_2 (2010) rund 10,7 % zu den gesamten österreichischen Emissionen bei.

Chemische Industrie: Ebenfalls unter Einsatz eines Energieträgers (hier: Erdgas) verläuft die Produktion von Ammoniak, deren Emissionen mit 540 kt CO_2 deutlich geringer liegen als die der Metallindustrie. Die Zuordnung ist hier eindeutig, da davon ausgegangen wird, dass Erdgas vollständig prozessbedingt verwendet wird. Noch einfacher ist die Zuordnung im Fall der Produktion von Salpetersäure, da die Emissionen nicht aus einem Energieträger stammen. N_2O ist ein Nebenprodukt der Oxidation von Ammoniak, dem ersten Prozessschritt. Die Emissionen von N_2O lagen im Jahr 2010 nur mehr bei 64 kt CO_2-Äq., da die einzige österreichische Anlage in Linz als europäisches Pilotprojekt seit 2004 mit Vorrichtungen zur katalytischen Reduktion des entstehenden N_2O ausgestattet ist, die 95 % dieses THG aus dem Abgasstrom entfernt.

Mineralische Produkte: Wichtige prozessbedingte Emissionen von CO_2 kommen aus dem Material selbst. Beim Erhitzen von karbonatischem Gestein wird die mineralische Struktur aufgebrochen und CO_2 freigesetzt. Bei der Zementproduktion macht dies für 2010 immerhin 1 622 kt CO_2 oder fast 2 % der gesamten österreichischen THG-Emissionen aus, die Kalkproduktion führt zu 574 kt CO_2. Emissionen lassen sich gut über die Materialzusammensetzung und den Karbonatanteil abschätzen. Messungen der Abgase des eigentlichen Brennprozesses sind nicht zielführend, da diese gemeinsam mit den Abgasen der Energieträger abgeführt werden und damit keine Unterscheidung zu den energetischen Emissionen möglich wäre. Ähnliches betrifft die Magnesium-Sinterung und die Position „Kalkstein- und Dolomitverbrauch“ (2010 jeweils ca. 300 kt CO_2), wobei letztere Zuschlagsstoffe im Hochofenprozess darstellen und die Emissionen somit mit der Metallerzeugung in Verbindung stehen (aber nicht dort geführt werden).

F-Gase: Die Emissionen von fluorierten Gasen (Fluorkohlenwasserstoffe, F-Gase), also fluorierten Derivaten von Kohlenwasserstoffverbindungen, werden ebenfalls den industriellen Prozessen zugeordnet. Als Industriegase spielen sie seit den 1990er Jahren eine immer größer werdende Rolle, da sie hauptsächlich bei Produktionsprozessen aufgrund ihrer interessanten Eigenschaften aktiv eingesetzt werden. Sie kommen auch als Reaktionsprodukte im Abgas von Aluminium-Elektrolyseanlagen vor und sind zu einem geringen Teil auch natürlich.

Wir betrachten vollfluorierte Kohlenwasserstoffe (PFCs), teilfluorierte Kohlenwasserstoffe (HFCs) und Schwefelhexafluorid (SF_6). Weitere Substanzen wie zum Beispiel Stickstofftrifluorid (NF_3), dessen klimaschädigende Eigenschaften bekannt sind, könnten in Zukunft ebenfalls im Zuge der Berichtspflichten unter dem Kyoto-Protokoll erfasst werden. F-Gase weisen eine hohe Klimawirksamkeit auf, da sie atmosphärische Verweilzeiten von bis zu mehreren hundert Jahren besitzen und dadurch 140 bis 23 900-mal so wirksam für den Treibhauseffekt sind wie CO_2. Aufgrund dieser Klimawirksamkeit ist ihre Verwendung in Österreich durch die Industriegasverordnung BGBl II Nr. 447/2002 (BGBl., 2002) eingeschränkt.

Der Sektor mit der größten Zunahme von F-Gasen ist der Kälte- und Kühlmittelbereich, der Kühlgeräte in privaten, gewerblichen und industriellen Anwendungen, Klimaanlagen, Wärmepumpen und Transportkühlung sowie mobile Klimageräte, also Klimaanlagen in Fahrzeugen, umfasst. Durch den starken Anstieg wird in diesem Bereich verstärkt nach Alternativen geforscht (z. B. alternative Kühlmittel, etwa CO_2), die allerdings teils aufwändige Sicherheitsauflagen und speziell geschultes Wartungspersonal benötigen, was den Umstieg erschwert. Auch im Bereich Klimaanlagen in Fahrzeugen wird stetig nach Alternativen geforscht, da laut EU Richtlinie 2006/40/EG ab 2011 nur noch auf F-Gase mit einem GWP kleiner als 150 gesetzt werden darf (Europäisches Parlament, 2006). Es ist derzeit zu erwarten, dass sich Gase mit sehr geringem GWP (z. B. viermal höher als das von CO_2) durchsetzen werden.

Weitere Anwendungsgebiete sind die Herstellung von bestimmten Schaumstoffen, Aerosolen (Sprays und medizinische Inhalatoren) und Halbleiterplatten in der Elektronikindustrie. In diesen Fällen ist die Verwendung von F-Gasen rückläufig. Als Lösungsmittel werden F-Gase kaum mehr eingesetzt, allerdings immer noch als Löschmittel, wo ihre Verwendung sogar zunimmt.

Die direkte Verwendung von SF_6 für Sportschuhsohlen, Autoreifen und Schallschutzfenster ist mittlerweile verboten. Hier kommt es noch zu Emissionen aus Restbeständen, die im Fall von Schallschutzfenstern noch in den nächsten 15 Jahren für einen großen Anteil der SF_6-Emissionen verantwortlich sein werden. Als Isoliergas in Hochspannungsschaltanlagen im Elektrizitätsbereich wird SF_6 weiter eingesetzt. Zwar benötigen modernere Systeme deutlich weniger Gas, aber mit steigenden Ansprüchen an die Sicherheit der Elektrizitätsversorgung werden mehr Schaltanlagen erforderlich.

Trends der Emissionen aus industriellen Prozessen

Abbildung 2.3 zeigt die Emissionen der industriellen Teilsektoren im Zeitraum von 1990 bis 2010 in Österreich. Einige markante Änderungen lassen sich auf konkrete Ursachen zurückführen:

- Entwicklung neuer Technologien zur N_2O-Absenkung in der chemischen Industrie (Salpetersäureproduktion) ab 2004.
- Wirtschaftskrise (2008/09): Einbruch der industriellen Produktion (v. a. Stahl und Zement).
- Steigerung der Stahlproduktion über fast die gesamte Periode.
- Emissionsreduktionen der PFCs zu Beginn der Periode erfolgen aufgrund des Auslaufens der primären Aluminiumproduktion in Österreich .
- Die Verwendung von HFCs stieg seit den 1990er Jahren v. a. im Kälte- und Kühlmittelbereich, bei Löschmitteln und Schäumungsmitteln als Alternative für die früher üblichen Fluor-Chlor Kohlenwasserstoffe (FCKW), die als Zerstörer der stratosphärischen Ozonschicht bereits seit 1995 durch die FCKW-Verordnung (BGBl., 1990) verboten sind.
- Die Emissionen von SF_6 erreichten Mitte der 1990er Jahre ein Maximum, das auf den vermehrten Einsatz dieses Gases in der Halbleiterherstellung, als Löschgas in Magnesium- und Aluminiumgießereien und bei der Herstellung von Schallschutzfenstern zurückzuführen war. Das Minimum im Jahr 2000 ist durch einen generellen Rückgang der Emissionen in diesen Bereichen begründet, der darauffolgende leichte Anstieg resultiert aus dem Einsatz des Gases bei der Produktion von Schuhsohlen, der jedoch bald darauf verboten wurde.

Im Jahr 2010 war der Bereich der Prozessemissionen mit 13 % (insgesamt 10 680 kt CO_2-Äq.) nach den energetischen Emissionen der wesentlichste Verursacher der österreichischen THG-Emissionen. Die Prozessemissionen der Industrie – inklusive F-Gase, aber ohne energetische Emissionen der Industrie – sind zwischen 1990 und 2010 um 5,7 % (+580 kt) angestiegen.

2.2.5 Lösungsmittel und Verwendung von Produkten

Diese Quellgruppe ist für die Gesamtemissionen recht unbedeutend, wird aber als eigene Position in der nationalen Inventur geführt. Sie beinhaltet indirekte CO_2-Emissionen nach

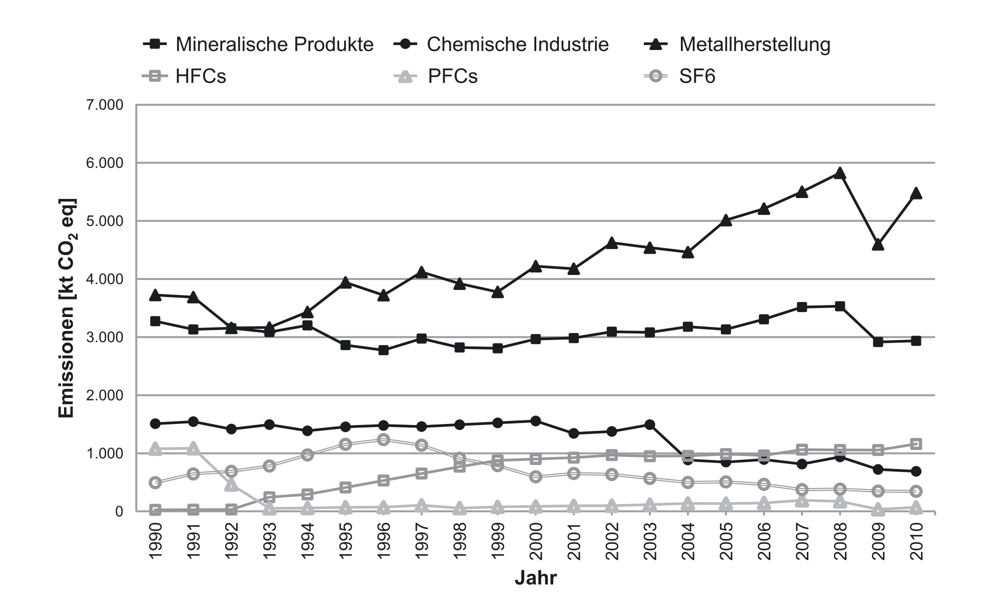


Abbildung 2.3 Emissionen der einzelnen industriellen Sektoren und Emissionen von fluorierten Gasen von 1990 bis 2010 in CO_2 Äquivalenten (Umweltbundesamt, 2012c)

Figure 2.3 Emissions by industrial subsectors and emissions of F-gases 1990-2010 presented as CO_2-equivalents (Umweltbundesamt, 2012c)

Verdampfung von Lösungsmitteln (Lösungsmitteldämpfe wandeln sich in der Atmosphäre praktisch vollständig zu CO_2 um) und die Verwendung von Lachgas als Anästhetikum oder im Lebensmittelbereich in Sprühdosen. Beide Beiträge sind ähnlich groß, insgesamt machen sie 0,4 % der österreichischen Emissionen aus (Umweltbundesamt, 2012c).

2.2.6 Landwirtschaft und Emissionen aus Böden

Emissionen aus der Landwirtschaft

Im Sektor Landwirtschaft werden die nachfolgend aufgeführten Quellen für CH_4- und N_2O-Emissionen unterschieden. Andere, durchaus in Zusammenhang mit der Landwirtschaft relevante Aktivitäten werden an anderer Stelle der Inventur behandelt (Düngemittelproduktion unter „Prozesse", Energie und Transport in den jeweiligen Sektoren).

- Methanemissionen aus der Wiederkäuerverdauung.
- Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement.
- Lachgasemissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement.
- Lachgasemissionen aus Böden.
- Indirekte Lachgasemissionen (durch Stickstoffverluste sekundär verursachte Emissionen).

Emissionsinventuren sollen nationale Emissionen so genau wie möglich abschätzen und den jährlichen Emissionstrend sowie den Effekt emissionsmindernder Maßnahmen zeigen. Im Bereich der Landwirtschaft spielt die Kenntnis der Tierhaltung und des Wirtschaftsdüngermanagements eine große Rolle. Sie ist Voraussetzung für das realitätsnahe Abschätzen von Emissionen. Der Effekt von Minderungsmaßnahmen lässt sich nur dann objektiv abbilden, wenn repräsentative Daten zum Wirtschaftsdüngermanagement vorhanden sind. Dazu wurden die Ergebnisse einer Umfrage zu Tierhaltung und Wirtschaftsdüngermanagement in Österreich – TIHALO – (Amon et al., 2007) in die nationalen Luftschadstoff- und THG-Inventuren eingebaut (Amon und Hörtenhuber, 2008; 2010).

Die Landwirtschaft war im Jahr 2010 mit 7 450 kt CO_2-Äq. für 8,8 % der österreichischen THG-Emissionen verantwortlich (Umweltbundesamt, 2012c). Davon stammen 48 % aus CH_4-Emissionen und 52 % aus N_2O-Emissionen. Von den landwirtschaftlichen THG-Emissionen im Jahr 2010 kommen 44 % aus den direkten verdauungsbedingten CH_4-Emissionen der Viehhaltung. Die CH_4- und N_2O-Emissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement sind kausal von den Tierbestandszahlen abhängig, sie umfassen 4 bzw. 12 % der Emissionen des Sektors. Für landwirtschaftliche THG-Emissionen bedeutender sind die N_2O-Emissionen (39 % im Jahr 2010) aus der Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Böden.

Alle diese Emissionen sind Ergebnisse mikrobieller Prozesse. Methan entsteht durch anaerobe Umsetzung von organischen Verbindungen, zu einem bedeutenden Teil im Verdauungstrakt von Wiederkäuern. Diese Umsetzung steht in Beziehung mit der Verdauung von Zellulose, die nur mit Unterstützung symbiotisch lebender Bakterien möglich ist. Die Emissionen hängen daher von der Anzahl und Fütterung von Wiederkäuern, insbesondere mit Raufutter, zusammen.

Lachgas wird mikrobiell vorwiegend im Boden gebildet, als Nebenprodukt von Prozessen zur chemischen Umwandlungen von Stickstoffverbindungen. Ausgangspunkt der Umwandlungen sind jeweils Substanzen, die Stickstoff in gebundener Form enthalten. Diese werden wesentlich durch Düngung eingebracht (Mineraldünger oder organischer Dünger, also Gülle), können aber auch von bestimmten Pflanzen (Leguminosen und deren symbiotisch lebenden Bakterien) aus der Atmosphäre fixiert werden, aus Ernterückständen stammen oder als Klärschlamm, atmosphärische Deposition von Stickstoff und Ausscheidungen von Weidetieren eingetragen werden.

Indirekte Lachgasemissionen aus Böden, speziell Waldböden

Die wichtigsten Quellen von N_2O stehen in Zusammenhang mit mikrobiellen Bildungsprozessen in Böden, Sedimenten und Gewässern. Auf globaler Ebene repräsentieren landwirtschaftliche Emissionen aufgrund der Verwendung von N-Düngern und Güllemanagement (4,3–5,8 Mt N_2O-N / Jahr) und Emissionen von natürlichen Böden (6–7 Mt N_2O-N / Jahr) bereits 56–70 % aller N_2O-Quellen (Butterbach-Bahl et al., 2013). Wälder zeigen in der Regel geringere N_2O-Emissionsraten als landwirtschaftliche Flächen, aufgrund ihres hohen Flächenanteils (48 % der österreichischen Landesfläche) ist die Summe der Waldemissionen jedoch wesentlich. Im Sinn der IPCC-Richtlinien (IPCC, 1997) handelt es sich um indirekte Emissionen, da die relevante anthropogene Aktivität, welche die Freisetzung von Stickstoffverbindungen auslöst, an anderer Stelle stattfindet als die N_2O-Emissionen.

Ein besseres Prozessverständnis des Ausmaßes, der Muster und Kontrollmechanismen von N_2O-Bodenemissionen auf unterschiedlichen Skalierungsebenen ist erforderlich, um die Verbindungen zwischen den primären Emittenten und der

eigentlichen Bildung von THG ausreichend beschreiben zu können. Dies wird etwa durch Freilandmessungen des N_2O Austausches zwischen Böden und der Atmosphäre in verschiedensten terrestrischen Ökosystemen sowie durch Laborinkubationsversuche unter kontrollierten Bedingungen – sowohl mit Böden als auch mit Reinkulturen von Mikroorganismen – ermöglicht.

Waldböden als Quellen indirekter Emissionen: Österreichische Untersuchungen in einem Tiroler Fichtenwald zeigten, dass N_2O bevorzugt in den obersten 10 cm des Bodens gebildet wird und aufgrund der geringeren Verfügbarkeit an organischem Kohlenstoff mit der Bodentiefe abnimmt (Henrich und Haselwandter, 1997). In einem Waldweideprojekt auf zwei steirischen Almen (Hieflau, Teufelsstein) erkannte man, dass sich der N-Kreislauf bereits 3–5 Jahre nach einer Schlägerung erholt hatte und auch die N_2O-Emissionen nach dem Eingriff wieder zurückgingen (Hackl et al., 2000). Im Donauraum (Lobau, Orth) wurde der Einfluss von Renaturierungsmaßnahmen in Flussauen auf potentielle N_2O-Emissionen untersucht und ein positiver Effekt, d. h. geringere Emissionen bei wiederhergestellter Konnektivität der Gewässer aufgedeckt (Welti et al., 2012).

In einer groß angelegten Naturwaldstudie (DIANA – soil Diversity In Austrian NAtural forests[2]) wurden unter anderem Emissionspotentiale von N_2O in zwölf Naturwaldreservaten in Wien, Niederösterreich und dem Burgenland untersucht. Neben dem Baumarteneinfluss führten vor allem erhöhte atmosphärische N-Einträge im Großraum Wien zu vergleichsweise hohen N_2O Emissionen. Dichte Wildschweinpopulationen stehen im Verdacht, durch das Durchwühlen des Bodens mikrobielle Aktivitäten zu verändern, den Standort zu eutrophieren und N_2O-Emissionen zu fördern (Hackl et al., 2004).

Stickstoffeinträge in Wälder in Form von nasser und trockener Deposition können N_2O-Emissionen fördern: Auf europäischer Ebene wurde das für Nadelwälder bestätigt (Pilegaard et al., 2006). Im Wienerwald zeigten Langzeitstudien einen deutlichen Effekt auch in Buchenbeständen (Kitzler et al., 2006), wo die Emissionen im Schottenwald (Wien) bei ca. doppeltem N-Eintrag (23 kg $N/ha \times J$) um ein Drittel (10,4 µg $N/m^2 \times h$) gegenüber dem „Reinluftstandort" Klausenleopoldsdorf erhöht waren; die NO-Emissionen aus den Böden waren sogar verzehnfacht. Eine deutlich verstärkte Re-Emission des eingetragenen Stickstoffs mit bis zu 15 %, im Vergleich zu 1 % (IPCC Standardfaktor für Inventuren) wurde festgestellt. Die Wirkungsmechanismen umfassen sowohl kurzfristig veränderte mikrobielle Aktivität nach N-Zugabe, als auch langfristig veränderte mikrobielle Gemeinschaften in N-beeinflussten Böden. Inzwischen ist man sich einig, dass die Wahl der Baumart sehr wesentlich für die N_2O-Emission ist. Aus naturschutzpolitischen Gründen ist eine vermehrte Einbringung von Laubbaumarten in Wälder wünschenswert, jedoch zeigen Buchenbestände und Mischwälder im Vergleich zu Fichtenreinbeständen aufgrund veränderter Bodeneigenschaften erhöhte N_2O-Emissionen (Ambus und Zechmeister-Boltenstern, 2006). Dies wurde EU-weit sowie in einer 3-jährigen Messserie in der Nähe von Wilhelmsburg, NÖ bestätigt (Pörtl et al., 2007).

Quellvariabilität: Die Ermittlung von N_2O-Bilanzen auf Landschaftsebene bis hin zur kontinentalen Ebene ist nach wie vor eine ungelöste Herausforderung und derzeitige Schätzungen sind mit großen Unsicherheiten behaftet. Das ist vor allem durch den sehr dynamischen und variablen Charakter der N_2O-Bodenemissionen bedingt, die durch eine Vielzahl von interagierenden Umwelteinflüssen kontrolliert werden. Aus diesem Grund werden Bodenemissionen von N_2O durch sog. „hot spots" und „hot moments" („heiße Punkte" und „heiße Momente") charakterisiert, d. h. durch eine enorme Variabilität auf einer großen Bandbreite von räumlichen und zeitlichen Skalen (Butterbach-Bahl und Dannenmann, 2011).

Nachdem die Verfügbarkeit von reaktivem Stickstoff N_r, (damit werden organisch gebundener N und mineralische N-Verbindungen mit Ausnahme von N_2 bezeichnet) der wichtigste Antrieb der N_2O-Bodenemissionen ist, ist auch der Düngereinsatz ein Schlüsselfaktor, der diese Emissionen kontrolliert. Aber erhöhte N_2O-Bodenemissionen kommen nicht nur auf gedüngten Flächen, als sog. direkte Emissionen, vor; aufgrund der kaskadischen Verteilung von Stickstoff auf Landschaftsebene, kann N_r von einem Applikationsort auf andere Ökosysteme verteilt werden, entweder mit dem Wind oder durch Auswaschung in Vorflutern. Dadurch kommt es zu einer Anreicherung von Stickstoff in natürlichen Ökosystemen und zur Entstehung von neuen „hot spots" für N_2O-Emissionen (sog. indirekte Emissionen). Für ein besseres Verständnis der N_2O-Bodenemissionen ist es daher einerseits notwendig den Stickstoffkreislauf von der Ökosystemebene zur regionalen und globalen Ebene besser zu verstehen. Andererseits müssen auch die Schlüsselprozesse der N_2O Bildung, des Abbaus und der Emission aufgeklärt werden. Die Herausforderung besteht darin, diese beiden Aspekte miteinander zu verbinden (Butterbach-Bahl und Dannenmann, 2011).

[2] http://bfw.ac.at/rz/bfwcms.web?dok=2966

2.2.7 Wälder als Kohlenstoffsenken

Biomasse, insbesondere das Holz in Wäldern, ist ein beträchtlicher Speicher für Kohlenstoff. Änderungen dieses Speichervolumens (in der Nordhemisphäre vor allem Zunahme des Kohlenstoffspeichers, sodass Wälder als Senken für atmosphärisches CO_2 dienen) sind so groß, dass sie im Vergleich mit den THG-Emissionen betrachtet werden müssen, um die Konzentrationsänderungen in der Atmosphäre korrekt beschreiben zu können.

Für die nationale österreichische Berichterstattung an die UNFCCC unter dem Kyoto-Protokoll werden die Daten der Österreichischen Waldinventur (ÖWI: www.waldinventur.at) herangezogen. Ergebnisse der Inventuren der Perioden 1986 bis 1990, 1992 bis 1996, 2000 bis 2002 und 2007 bis 2009 erlauben gute Aussagen über den Kohlenstoffgehalt der Wälder. Weniger gut lassen sich damit Landnutzungsänderungen bestimmen (Zunahme der Waldfläche), da diese Änderungen in Österreich auf viele kleine Flächen beschränkt sind und mit dem Erhebungsraster der ÖWI nicht so genau erfasst werden.

Waldfläche: Österreich verfügt über fast 4 Mio. ha Wald (47,6 % der Landesfläche: Russ, 2011). Die nachhaltige Waldbewirtschaftung ermöglichte in der Vergangenheit die Bildung und Erhaltung eines großen Kohlenstoffvorrates (1990: 339 ± 42 Mt C in der Biomasse und 463 ± 185 Mt C im Boden; Umweltbundesamt, 2000). Seit der ersten bundesweiten Erhebung (1961 bis 1970) hat die Waldfläche vor allem durch Bewaldung von ehemals landwirtschaftlich genutzten Flächen (ca. 60 % der Zunahme) sowie von extremen Standorten und Naturflächen (ca. ein Drittel der Zunahme) zugenommen (Tabelle 2.1). Die übrigen Neubewaldungsflächen sind ehemalige Bergbauflächen, Deponien oder sonstige Flächen (Russ, 2011). Mehr als vier Fünftel des österreichischen Waldes sind im Privatbesitz. Rund zwei Drittel davon gehören forstlichen Kleinbetrieben mit Betriebsgrößen unter 200 ha, von denen die meisten auch noch landwirtschaftliche Flächen bewirtschaften. Der größte Teil der Waldzunahme findet auf landwirtschaftlichen Grenzertragsstandorten durch Flächenstilllegungen und aktive Aufforstung statt. Die Waldfläche nimmt in allen Lagen zu, am stärksten in den Hochlagen über 1 800 m Seehöhe.

Schätzung der Biomasse und Umrechnung auf Kohlenstoffvorräte: Der Zuwachs wird aus der Differenz der Holzvolumina zwischen zwei Inventurperioden berechnet und es werden Korrekturfaktoren berücksichtigt, die sich z. B. aus der richtigen Behandlung der „Einwüchse" ergeben, also von Bäumen, die in der vorigen Inventurperiode aufgrund ihrer geringen Dimension nicht berücksichtigt wurden, aber in der

Tabelle 2.1 Landnutzung und Änderung der Landnutzung mit Bezug zur Waldfläche (Umweltbundesamt, 2012c)
Table 2.1 Land use and changes in forest area (Umweltbundesamt, 2012c)

	ha 1990	ha 2010	ha Veränderung
Waldfläche	3 891 333	3 999 857	108 524
unverändert als Wald bewirtschaftet	3 504 743	3 780 840	276 097
Nadelwald	2 432 897	2 557 136	124 239
Laubwald	737 690	984 604	246 914
Nicht-Ertragsfläche	334 156	239 100	−95 056
Fläche, die in den vorausgehenden 20 Jahren zu Wald umgewandelt wurde	386 591	219 018	−167 573
Ackerland zu Wald	60 661	31 884	−28 777
Grünland zu Wald	225 828	129 101	−96 727
Feuchtgebiet zu Wald	17 528	9 386	−8 142
Siedlungsgebiet zu Wald	54 258	25 576	−28 683
Anderes Land zu Wald	28 315	23 071	−5 244
Waldfläche, die in den vorausgehenden 20 Jahren zu anderen Nutzungsformen umgewandelt wurde	193 008	113 299	−79 709
Wald zu Ackerland	9 652	8 675	−977
Wald zu Grünland	99 259	61 712	−37 547
Wald zu Feuchtgebiet	5 055	3 356	−1 699
Wald zu Siedlungsgebiet	29 872	19 048	−10 824
Wald zu anderem Land	49 170	20 508	−28 662

Folgeinventur das geschätzte Stammvolumen vergrößern. Für die Abschätzung der jährlichen Holzernte stehen neben den Daten der ÖWI auch die Holzeinschlagsmeldungen zur Verfügung. Die ÖWI-Daten sind für die Bilanz besser geeignet, da alle Veränderungen der Biomasse im österreichischen Wald dargestellt werden. Damit werden etwa der Holz-Eigenverbrauch und andere Prozesse, die nicht mit dem Holzeinschlag im Zusammenhang stehen, miterfasst. So wirken sich auch Klimaänderungen (Verlängerung der Vegetationsperiode) und Verbesserung der Waldernährung durch atmosphärische Einträge von Stickstoff auf die Bestandsdichte aus.

Um von den ÖWI-Daten in Kohlenstoff umzurechnen werden Konversionsfaktoren von feldfrischem auf trockenes Holz sowie der Kohlenstoffgehalt des Holzes verwendet (Umweltbundesamt, 2010). Der Kohlenstoffgehalt der trockenen Äste, Nadeln und Wurzeln liegt bei 47–48 %. Die Methodik der ÖWI ist auf die Erfassung des Stammvolumens ausgerichtet. Mit landesspezifischen Konversionsfunktionen werden die einzelnen Kompartimente der Biomasse errechnet. Für die Hauptbaumarten wurden die relevanten Funktionen entwickelt (Ledermann und Gschwantner, 2006; Ledermann und Neumann, 2006; Gschwantner und Schadauer, 2006; Offenthaler und Hochbichler, 2006; Umweltbundesamt, 2010). Stehendes Totholz wird hier ebenfalls erfasst.

Bodenkohlenstoff: Im Boden liegt organischer Kohlenstoff im Auflagehumus und im Mineralboden vor. Die Waldböden Österreichs wurden in der Österreichischen Waldbodenzustandsinventur 1987 bis 1989 terrestrisch erhoben. Ein Teil der Waldböden wurde 2007 wieder untersucht. Die Veränderung des Kohlenstoffvorrates im Boden ist nur mit großem Aufwand feststellbar, da der Kohlenstoffvorrat kleinräumig heterogen ist und die zeitlichen Veränderungen eher gering sind. Für statistisch abgesicherte Aussagen zu Veränderungen wären daher erheblich größere Stichproben notwendig, als sie tatsächlich verfügbar sind. Das Ergebnis der Wiederholungsinventur war, dass der Kohlenstoffpool an etwa gleich vielen Standorten zu- bzw. abnahm. Bei einer Simulation der Böden mit dem Programm Yasso07 (Tuomi et al., 2009) wurde eine leichte Abnahme des Kohlenstoffvorrates festgestellt, die jedoch statistisch nicht von Null unterscheidbar ist.

Entnahme von Holz: Da die Holzernte viele Jahre hinter dem Zuwachs deutlich zurück blieb, erhöhte sich der Holzvorrat zwischen 1971/80 und 2007/09 von 827 Mio. auf 1 135 Mio. Vorratsfestmeter. Besonders groß war die Schere zwischen Zuwachs und Nutzung in den 1990er Jahren. Der Forstsektor hat auf diese Entwicklung reagiert und die Holzernte erhöht. Erstmals wurde in der Inventurperiode von 2007 bis 2009 in den Forstbetrieben und den Bundesforsten

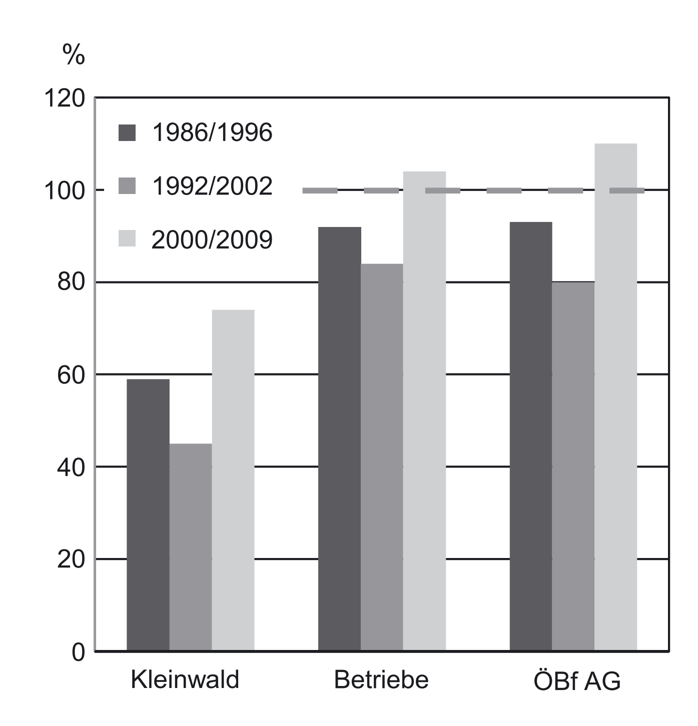


Abbildung 2.4 Entwicklung des Nutzungsprozents (Anteil der Ernte am Zuwachs) in Abhängigkeit von der Betriebsgröße und Periode (Büchsenmeister, 2011)

Figure 2.4 Use ratio (harvest vs. regrowth) over time for different size classes of forest ownership (Büchsenmeister, 2011)

die verstärkte Nutzung des Zuwachses sichtbar. Es kam sogar zu einer leichten Übernutzung des Waldes (Abbildung 2.4). Damit wurde ein Teil des Nutzungsbedarfes abgedeckt, gleichzeitig wurde durch die erhöhte Nutzung die Kohlenstoffsenke des Waldes verringert (siehe dazu auch Band 2, Kapitel 3). Als Gründe lassen sich einerseits Zwangsnutzungen durch Sturmschäden nennen, andererseits führten hohe Holzpreise und politische Anstrengungen zur Mobilisierung, also Nutzung des Holzzuwachses, zur Abnahme des durchschnittlichen Zuwachses im österreichischen Wald. Durch die Erhöhung des Holzeinschlages und der Entnahme besonders wüchsiger (produktiver) Bestände ist allerdings die durchschnittliche Produktivität leicht rückläufig.

2.2.8 Treibhausgase aus der Abfallbehandlung

Die „Klimarelevanz der Abfallwirtschaft“ wurde bereits 1999 einer umfassenden Analyse unterzogen (Hackl und Mauschitz, 1997; Hackl und Mauschitz, 1999). Hierbei wurde deutlich, dass die Deponierung von Abfall aufgrund der freigesetzten Deponiegase (CH_4 und CO_2, aber auch FCKWs und N_2O) einen nicht unbedeutenden Anteil an den THG-Emissionen hat. Aufgrund des großen Anteils und der vorhandenen Miti-

gationsmöglichkeiten scheint insbesondere die Verhinderung der Emission von CH_4 aus anaeroben Umwandlungsprozessen biologisch abbaubarer Kohlenstoffverbindungen vordringlich. THG entstehen auch im Bereich von Kläranlagen sowie bei Müllverbrennungsanlagen.

Änderungen der biogen gebundenen Menge an Kohlenstoff werden in der Inventur nicht über die Emissionen in die Atmosphäre, sondern über die Bestandsänderungen festgestellt (siehe Band 2, Kapitel 2), somit werden im Gegensatz zu fossilen CO_2-Emissionen jene aus biogenem Material nicht bilanzwirksam. Insbesondere in Müllverbrennungsanlagen gestaltet sich die Bestimmung jenes CO_2-Anteils, welcher aus der energetischen Umsetzung biogener Restmüllkomponenten entstammt und daher weiter nicht betrachtet werden muss, oft zeit- und kostenintensiv. Hilfestellung bei der Ermittlung des biogenen Kohlenstoffanteils im Restmüll kann die Bilanzen-Methode leisten (Fellner et al., 2007; Obermoser et al., 2009). Sie erlaubt unter Verwendung routinemäßig erfasster Betriebsparameter, biogene und fossile CO_2-Emissionen ausreichend genau zu bestimmen. Die Methode basiert auf einem Abgleich von theoretischen Güter-, Stoff- und Energiebilanzen mit messbaren Bilanzen einer Anlage. Das Verfahren ermöglicht es neben den biogenen und fossilen CO_2-Emissionen auch die Anteile der eingesetzten Primärenergieträger im Abfallinput zu bestimmen.

Während generell bei Müllverbrennungsanlagen genügend Daten über die Zusammensetzung etwa des Roh- und Reingases veröffentlicht werden, um fundierte Aussagen über Schadstoffemissionen zuzulassen, ist dies für kalte Abfallbehandlungsverfahren weniger der Fall. Vor allem für die mechanisch-biologischen Methoden ist eine Aussage darüber, ob die veröffentlichten Messwerte als repräsentativ für diese Behandlungstechnik zu bezeichnen sind, aus heutiger Sicht nicht möglich. Dazu fehlt die Definition eines gemeinsamen Standes der Technik, es mangelt an einschlägigen Verordnungen und die Unterschiede in der Zusammensetzung des Deponiegutes sind groß, die Messtätigkeit unzureichend angesichts der Vielzahl von betriebenen Anlagen. Es ist zwar bekannt, dass es unter bestimmten Betriebsbedingungen (Deponie-, Rotteführung) bei Eingangsmaterialien mit höheren biologisch abbaubaren Stickstoffgehalten, abhängig von der Population der vorhandenen Mikroorganismen, zu einer vermehrten N_2O-Bildung bei biologischen Abbauprozessen kommen kann. Eine Quantifizierung der N_2O-Emissionen ist jedoch wegen der teils widersprüchlichen und teils lückenhaften Datenlage noch nicht mit der wünschenswerten Genauigkeit möglich. Ebenso ist eine mögliche Immobilisierung von im Substrat vorhandenem Kohlenstoff in Böden, welche die Emissionen reduzieren würden, über den dafür notwendigen Zeitraum von mehreren hundert Jahren hinweg bei kalten Abfallbehandlungsverfahren kaum abschätzbar.

Umfassende THG-Emissionsbilanzen der Abfallwirtschaft betrachten über die direkten Emissionen hinaus auch indirekte bzw. vermiedene Emissionen. Darunter werden einerseits Emissionen verstanden, die in der Vorkette der abfallwirtschaftlichen Aktivitäten auftreten (Transport, Energiebereitstellung etc.), andererseits aber auch jene Emissionen in Abzug gebracht, die bei energetischer Verwertung von Abfall (in Müllverbrennungsanlagen oder bei der Nutzung von Deponiegas) an anderer Stelle im System, insbesondere bei der Energiebereitstellung, vermieden bzw. eingespart werden können. Indirekte Emissionen sind relevant für eine systemhafte Betrachtung der Abfallwirtschaft, in eine nationale Emissionsinventur gehen sie jedoch an anderer Stelle ein (Hackl und Mauschitz, 1996).

Aus neuen, umfangreichen Modellberechnungen zur Abschätzung des Minderungspotentials für THG aus dem Bereich Restmüllbehandlung (Mauschitz, 2009; BMLFUW, 2009) lassen sich Bilanzen der CO_2- und CH_4-Emissionen der österreichischen Abfallwirtschaft darstellen. Für 2006 beträgt der Anteil der durch Restmüll bedingten THG-Emissionen mit ca. 1 250 kt CO_2-Äq. etwa 1,5 % der Gesamtemissionen. Im Vergleich zu 1990 war eine stete Abnahme der sektoralen Emissionen von ursprünglich 2 030 kt CO_2-Äq. zu verzeichnen, dies entspricht einem Rückgang um mehr als 38 %. Damit sanken die sektoralen spezifischen Emissionen um ca. 18 % auf 0,89 t CO_2-Äq. / t Restmüll. Für diese Entwicklung hauptverantwortlich war die Emissionsverminderung aus dem Bereich der Mülldeponierung. Die Emissionen aus der Restmülldeponierung betrugen 1990 1 672 kt CO_2-Äq. und reduzierten sich bis 2006 um ca. 56 %, was auf schärfere gesetzliche Bestimmungen im Rahmen der Deponieverordnung (BGBl, 1996) zurückgeht, welche die deponierte Restmüllmenge von ca. 1,21 Mt / Jahr im Jahr 1990 bis 2006 um mehr als 88 % absinken ließ. Darüber hinaus wirkten sich die vermehrte Deponiegassammlung, die höheren Verwertungsquoten des Deponiegases, die Verstromung in effizienteren Deponiegasmotoren, der deutlich höhere Anteil thermisch verwerteten Restmülls und die effizientere externe Verbrennung der in den mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen gezogenen heizwertreichen Leichtfraktion emissionsmindernd aus.

Die Resultate der für 2013 gerechneten Szenarien veranschaulichen den Einfluss, der sich ergibt, wenn der Aufteilungsschlüssel für die anfallende Restmüllmenge für die Behandlungsvarianten thermische Restmüllverwertung und

mechanisch-biologische Abfallbehandlung variiert wird. Es wird deutlich, dass eine stärkere Emissionsreduktion erzielt werden könnte, wenn durch Müllvermeidung weniger Restmüll zur Behandlung anfallen würde und wenn vor allem der Behandlungsanteil durch Müllverbrennungsanlagen erhöht, hingegen der mechanisch-biologische Behandlungsanteil zurückgenommen werden würde. Bei vollständiger thermischer Verwertung des Restmülls in Müllverbrennungsanlagen würden sich die Emissionen im Vergleich zu 1990 im günstigsten Fall um ca. 85 % absenken lassen, da die Emissionsvermeidung in anderen Sektoren (vermiedene Emissionen) hier der Abfallwirtschaft angerechnet werden könnte. Bei ausschließlich mechanisch-biologischer Restmüllbehandlung ergäbe sich im ungünstigsten Fall eine Emissionsreduktion um nur noch 15 % gegenüber 1990. (Bzgl. der thermischen Verwertung von Abfall siehe auch Band 3, Kapitel 3)

Die vorliegenden THG-Emissionsbilanzen verdeutlichen, dass der Bereich Restmüll am nationalen Reduktionsziel von 22 300 kt CO_2-Äq. einen Beitrag in der Größenordnung von 1 200 bis 1 600 kt CO_2-Äq. zu leisten vermag. Dieser Beitrag ist als leicht realisierbar einzustufen (siehe auch Band 3, Kapitel 2).

2.2.9 Inventur der Feinstaub-Emissionen Österreichs

Inventuren der Freisetzung von Feinstaub (Particulate Matter, PM) wurden vor allem wegen der gesundheitlichen Auswirkungen von PM entwickelt, können aber, gemeinsam mit Wissen über die chemischen und physikalischen Eigenschaften der emittierten Partikel, auch als Basis für Berechnungen von klimarelevanten Parametern von Aerosolen herangezogen werden.

Die PM Inventur Österreichs wurde entsprechend den Anforderungen entwickelt, welche die Konvention über Ferntransport von Luftschadstoffen ihren Unterzeichnerstaaten vorschreibt. Diese Inventur ermittelt Emissionen von Primäraerosolen, d. h. direkte Partikelemissionen in die Atmosphäre, nicht jedoch Partikel, die mittels atmosphärischen chemischen Reaktionen aus gasförmigen Substanzen entstehen, und an Partikeln kondensiertes Material (siehe Abschnitt 2.3.1 bzw. 2.3.2). Die Erfassung der PM Emissionen erfolgt nach Quellgruppen und unterscheidet Korngrößen. Ausgewiesen werden die Emissionen von Partikel kleiner als 2,5 µm aerodynamischer Durchmesser (PM2.5) sowie jener kleiner als 10 µm aerodynamischer Durchmesser (PM10). Die Ergebnisse der österreichischen Inventur werden jährlich an die „Economic Commission for Europe“ der Vereinten Nationen (UNECE) weitergeleitet (z. B. Umweltbundesamt, 2011a).

Die Methodik, die der österreichischen PM Inventur zugrunde liegt, wurde von Winiwarter et al. (2001b bzw. 2007) beschrieben. Dabei werden, analog zu Emissionserhebungen für THG, statistische Kennzahlen und für Österreich relevante Emissionsfaktoren verwendet, um zu den jeweils quellgruppenspezifischen Emissionen zu gelangen.

Zunächst ist eine Unterscheidung anhand des Vorganges der Emission sinnvoll. Partikel, die durch mechanische Zerkleinerung entstehen, sind meist größer als 2,5 µm und werden leichter wieder aus der Atmosphäre entfernt. Emissionsabschätzungen sind normalerweise nicht leicht möglich und mit großen Unsicherheiten behaftet. Allerdings sind diese Partikel für klimatische Effekte weniger bedeutsam (siehe Band 1, Kapitel 1). Dagegen haben Partikel, die über Kondensation von Substanzen aus der Gasphase z. B. bei Verbrennungsprozessen entstehen, Größen von Bruchteilen von µm. Hier sind sowohl optisch aktive und somit direkt klimawirksame Teilchen zu finden, als auch solche, die (oft erst nach chemischen Reaktionen in der Atmosphäre) hygroskopisch wirken und über die Beeinflussung von Wolkenbildung indirekt auf das Klima wirken können (siehe Band 1, Kapitel 1). Die Emissionen von Partikeln aus geschlossenen Verbrennungsprozessen können gut erfasst werden, da die Konzentrationen im Rauchgas üblicherweise recht hoch sind und daher die Bestimmung von Emissionsfaktoren sehr zuverlässig ist.

Abbildung 2.5 zeigt die Aufteilung der Emissionen der aktuellen PM2.5 Inventur nach Quellgruppen. Die Verwendung der Sektoren nach dem „New format of reporting“ (NFR) stimmt zwar weitgehend überein mit den Sektoren der THG-Inventur, aber diese Gliederung ist für PM wesentlich schlechter geeignet als die von Winiwarter et al. (2007) verwendeten Quellgruppen, da sie für Luftschadstoffe zu wenig eindeutig ist. Dennoch lassen sich wichtige Aussagen ableiten.

Die „sonstigen“ energierelevanten Emissionen stellen den größten Anteil dar. Sie beinhalten Kleinverbraucher des Sektors Raumwärme und umfassen vorwiegend Emissionen aus Heizungen mit Festbrennstoffen, insbesondere Holz. Relevant sind vor allem alte Heizanlagen und Einzelöfen. Moderne Anlagen werden auf ein Drittel des Bestandes geschätzt (Winiwarter et al., 2007), aufgrund ihrer Effizienz tragen sie jedoch nur geringfügig zu den Emissionen bei. Da Heizanlagen hohe Lebenszeiten haben und selten ausgetauscht werden, ist die Wirkung von alten Anlagen noch über längere Zeiträume zu erwarten. Dieser Quelle ist daher besondere Beachtung zu schenken (siehe Abschnitt 2.2.10). Bei Emissionen aus dem Hausbrand sind schwarzer und brauner Kohlenstoff bedeutende Komponenten, die gleichzeitig besonders klimawirksame Bestandteile des Aerosols sind.

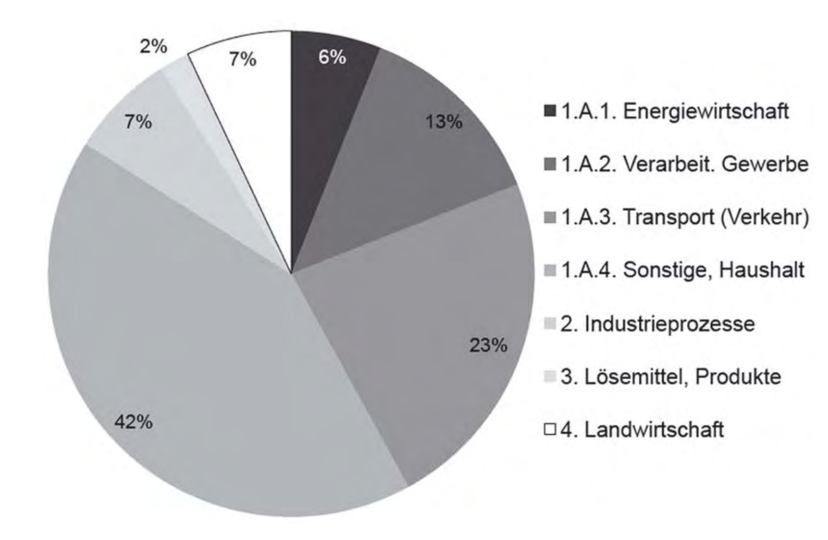


Abbildung 2.5 Aufteilung der PM2.5 Emissionen Österreichs (2010) nach 'NFR' Quellgruppen

Figure 2.5 Partitioning of PM2.5 emissions in Austria (2010) according to 'NFR' source sectors

Verkehrsemissionen umfassen die Aufwirbelung von Straßenstaub (überwiegend in der Fraktion größer als 2,5 µm) und Verbrennungsprodukte vor allem von Dieselmotoren, hauptsächlich Dieselruß. Moderne Dieselfahrzeuge verfügen über Partikelfilter, die diese Emissionen deutlich reduzieren. Durch den raschen Austausch der Fahrzeugflotte, vor allem von Fahrzeugen mit hoher Kilometerleistung, wird trotz weiterer Verkehrszunahme ein Rückgang der Emissionen von Dieselruß erwartet. Ein Problem bleiben jedoch die Baumaschinen, Traktoren und andere Geräte, die oft lange Lebenszeiten haben und daher ohne gesonderte Maßnahmen weiterhin eine wichtige PM Quelle bleiben werden (in der Abbildung zwischen „Landwirtschaft", „Transport" und „verarbeitendes Gewerbe" aufgeteilt).

2.2.10 Freisetzung von Ruß aus Kleinfeuerungen

Die unvollständige Verbrennung von fossilen oder biogenen Brennstoffen führt bei Kleinfeuerungen zu Emissionen von Ruß und optisch wirksamen schwer-flüchtigen Kohlenwasserstoffen. Die Klimawirksamkeit dieser Emissionen wird in Band 1, Kapitel 1 beschrieben. Im Mittelpunkt der österreichischen Forschung der letzten Jahre auf diesem Gebiet standen die Charakterisierung der Aerosole aus der Biomasseverbrennung im kleinen Leistungsbereich und die Erstellung von chemischen Partikelemissionsprofilen für unterschiedliche Feuerungs- und Brennstofftypen. Ergebnisse zu Rußemissionen aus Heizöl- bzw. Erdgaskleinfeuerungen aus den USA sind aufgrund der zum Teil unterschiedlichen Technik nur bedingt auf Österreich anwendbar.

Trotz methodischer Probleme bei der Bestimmung von Ruß und seiner Trennung in die klimarelevanten Fraktionen elementaren (EC) bzw. schwarzen (BC) und braunen (BrC) Kohlenstoff (beschrieben z. B. von Cavalli et al., 2010, Schmid et al., 2001) gelang eine Bestimmung der relativen Anteile dieser Fraktionen in den Emissionen diverser mit Biomasse befeuerter Verbrennungsprozesse. Die Emissionen z. B. eines typischen österreichischen Kachelofens für unterschiedliche Holzarten und Holzbriketts enthielten 9,8 % (Lärchenscheitholz) bzw. 31 % (Weichholz-Briketts) EC (Schmidl et al., 2008b; Tabelle 2.A13 im Anhang). Partikelemissionen aus der offenen Verbrennung von Gartenabfällen (Laub) wurden ebenfalls untersucht. Je nach eingesetzter Methode ergab sich ein EC bzw. BC Gehalt der Emissionen zwischen 2 und 10 % (Schmidl et al., 2008a). Allgemein scheint im Gegensatz zur Situation bei Ruß aus Dieselmotoren bei Aerosolen aus der Verbrennung biogener Brennstoffe der Übergang zwischen hochsiedenden (meist Licht, d. h. sichtbare Strahlung, absorbierenden) organischen Verbindungen und Ruß fließend zu sein. Auf diesem Gebiet besteht noch ein erheblicher Forschungsbedarf.

Emissionsfaktoren für vier unterschiedliche Biomasse-Feuerungssysteme – ein Pelletofen, ein Pellet-Hackgut Kombikessel und zwei Scheitholzöfen – wurden im Labor unter verschiedenen praxisnahen Betriebsbedingungen inklusive Fehlbedienungen bestimmt (Schmidl et al., 2011). Für die automatischen Feuerungen konnten nur bei Start und Teillast-Betrieb EC Emissionen festgestellt werden, die jedoch unter 10 mg/MJ Brennstoffwärmeleistung lagen. Bei den Scheitholzöfen wurden EC Emissionen im Mittel zwischen 20 und 30 mg/MJ und bei Fehlbedienung bis zu 50 mg/MJ gemessen (Tabelle 2.A13 im Anhang). Bei einem modernen Pellet- sowie einem modernen Scheitholzkessel wurden keine und für einen Hackgutkessel sehr niedrige Ruß-Emissionen (11,6 % bzw. 1,5 mg/MJ) gefunden (Kelz et al., 2012). Der alte Scheitholz-

kessel sowie moderne und alte Öfen zeigten deutlich höhere Emissionen (44–70 % bzw. 12–46 mg/MJ).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass moderne mit Biomasse befeuerte Heizsysteme sehr geringe, die noch verbreitet im Einsatz befindlichen Einzelöfen und Scheitholzkessel jedoch erhebliche Rußemissionen bedingen, welche die Vorteile der Vermeidung fossiler CO_2-Emissionen wegen der Strahlung absorbierenden Eigenschaften von Ruß wieder verringern können (Jacobson, 2010).

2.3 Treibhausgase und Partikel in der Atmosphäre – Bildung und Konzentrationen
2.3 Greenhouse gases and particulate matter in the atmosphere: formation and concentrations

Bei allen Aerosolen muss zwischen Primäraerosolen (d. h. Partikeln, die direkt von der Quelle emittiert werden) und sekundären Aerosolen, die erst in der Atmosphäre aus Vorläufergasen gebildet werden, unterschieden werden. Primärpartikel werden in den PM Inventuren (siehe Abschnitt 2.2.9) berücksichtigt.

Wissen über die Bildung von sekundären Partikeln (Nukleation) aus gasförmigen Vorläufersubstanzen in der Atmosphäre ist essentiell für die Abschätzung des Einflusses der Aerosole auf die Strahlungsbilanz der Erde. Diese Prozesse sind derzeit ein intensiver Gegenstand von Forschung weltweit und auch in Österreich. Sie werden z. B. im CLOUD Experiment (Kirkby et al., 2011) untersucht, in dem auch zwei an der Universität Innsbruck entwickelte Geräte (ein Protonen-Tausch-Reaktions-Flugzeit-Massenspektrometer, PTR-TOF-MS, Graus et al., 2010; und ein Ammoniak-CIMS, Normann et al., 2007) im Einsatz sind. Weitere Aktivitäten enthalten Smogkammerexperimente (Metzger et al., 2010) sowie Modellierungen des Wachstums der Partikel (Boy et al., 2003).

In den folgenden Abschnitten 2.3.1 und 2.3.2 werden zuerst gasförmige Vorläufersubstanzen und die Bildung von Sekundäraerosol beschrieben und in weiteren Abschnitten die Konzentrationen von Aerosolen und THG in Österreich behandelt.

2.3.1 VOCs als Vorläufer für organisches Sekundäraerosol

Atmosphärische Aerosole bestehen zu 20–90 % aus organischem Material (Kanakidou et al., 2005; diese Arbeit gibt auch einen Überblick über das Wissen über organische Aerosole weltweit). Für Österreich ergab die AUPHEP Studie (Puxbaum et al., 2004) z. B. für Wien einen Anteil des kohlenstoffhältigen Aerosols von ca. 40 % an PM2.5. Neue Studien zeigen, dass sekundäres organisches Aerosol (SOA) die organische Aerosolfraktion dominiert (Heald et al., 2005; Zhang et al., 2007; Murphy et al., 2006; de Gouw et al., 2005; de Gouw und Jimenez, 2009). Neueste Freilandstudien weisen darauf hin, dass die SOA Bildung in verschmutzten Luftmassen viel effizienter geschieht, als dies aus den erhaltenen Aerosolmengen bei Laboruntersuchungen einzelner volatiler organischer Verbindungen (VOC) abgeschätzt werden kann (Heald et al., 2005; Volkamer et al., 2006). Die größte Unsicherheit dabei wird den noch ungenügend charakterisierten Quellen und Senken der gasförmigen VOC und semi-volatilen organischen Verbindungen (SVOC) zugeschrieben.

Eine möglichst genaue Bestimmung der Konzentrationen und Emissionsflüsse von VOC und SVOC ist von entscheidender Bedeutung, um die Entstehung und die Entwicklung von SOA zu verstehen. Mit dem PTR-TOF-MS konnten zum ersten Mal die Emissions- und Depositionsflüsse von vielen VOC über einer bewirtschafteten Wiese im Stubaital quantitativ gemessen werden (Müller et al., 2010; Ruuskanen et al., 2011). Nach einem Hagelsturm im Juli 2009 wurden erhöhte Konzentrationen von Monoterpenen und Sesquiterpenen in der Atmosphäre festgestellt. Diese biogenen SOA Vorläufersubstanzen stammen aus erhöhten Emissionen der beschädigten Nadelbäume, die an den umliegenden Berghängen wachsen. Neben der sturmbedingten Erhöhung der Emissionen wurde zum ersten Mal auch die Deposition dieser Stoffe in eine Wiese festgestellt. Über die Deposition von reaktiven organischen Verbindungen in terrestrische Ökosysteme ist noch wenig bekannt. Das derzeitige Wissen über die reaktive Kohlenstoffbilanz zwischen Biosphäre und Atmosphäre sollte neu überdacht werden (Bamberger et al., 2011) und eine mögliche Veränderung der Flüsse der an sich biogenen Substanzen durch anthropogene Klimaänderungen in Betracht gezogen werden.

2.3.2 Ozon und Sekundäraerosol aus Vorläufersubstanzen

Bodennahes Ozon trägt ca. 15 % zum Treibhauseffekt bei (IPCC, 2001). Es wird in der Atmosphäre aus Luftsauerstoff in Anwesenheit von NO_x und VOC durch photochemische Reaktionen gebildet. Bei diesen Reaktionen bilden sich auch großmolekulare organische Verbindungen, die entweder an vorhandenen Aerosolpartikeln kondensieren oder neue Partikel bilden können (SOA: siehe oben). Weitere atmosphärische

Reaktionen, insbesondere die Oxidation von SO_2 und NO_x zu Sulfaten und Nitraten, führen zur Bildung von anorganischem Sekundäraerosol, woran auch Ammoniak (NH_3) beteiligt ist. Ammonnitrat, eine wichtige Komponente des anorganischen Sekundäraerosols, wird vor allem bei niedrigen Temperaturen gebildet und kann bei hohen Temperaturen wieder in die Gasphase übergehen.

Die genannten Vorläufergase (NH_3, NO_x, SO_2, VOC) sind einerseits als Luftschadstoffe relevant und andererseits über die Bildung von Ozon sowie Sekundäraerosol indirekt klimawirksam. Die Emissionen dieser Gase sowie auch die der primär freigesetzten Partikel (siehe Abschnitt 2.2.9) werden in Österreich erfasst (Umweltbundesamt, 2012b), jedoch gibt es keine Abschätzungen über die Menge an Sekundäraerosol, die aus den Vorläufergasen gebildet wird.

Die Konzentration von troposphärischem Ozon (O_3) über Österreich wurde mit Hilfe von statistischen Modellen (Loibl et al., 1994) und von chemischen Transportmodellen (Hirtl et al., 2011) simuliert. Die Langzeit-Ozonbelastung wird in Österreich überwiegend durch Emissionen und Ozonbildung auf kontinentaler – teilweise auf nordhemisphärischer – Skala bestimmt.

Auch bei sekundären atmosphärischen Aerosolen sind Messungen (siehe Abschnitt 2.3.3) und Modellsimulation vorwiegend auf das Thema Luftverschmutzung ausgerichtet. Einige wenige Modellierungsversuche (Winiwarter et al., 2001a) zeigen, unter Verwendung von leicht modifizierten Ozonmodellen, die Bildung von SOA in der Abluftfahne einer Stadt vor allem im Sommer bei hoher Temperatur und Globalstrahlung. Die Bedeutung dieser SOA Bildung für die Strahlungsbilanz wird in kontinentalen Modellen behandelt (z. B. im EMEP Modell, Simpson et al., 2012), auch wenn eine solche Modellierung derzeit noch mit sehr großen Unsicherheiten verbunden ist (Hallquist et al., 2009).

2.3.3 Messungen von PM Konzentrationen

Luftgütemessungen auf gesetzlicher Basis durch Bund und Länder dienen in erster Linie der Überwachung der Einhaltung von Grenzwerten, Zielwerten, Alarm- oder Informationsschwellen zum Schutz der menschlichen Gesundheit sowie zum Schutz der Vegetation und von Ökosystemen. Die in den Messnetzen gesammelten Daten sind jedoch wegen der Klimarelevanz der sekundären Aerosole, für die SO_2, NO_x und O_3 eine wichtige Rolle als Ausgangssubstanzen bzw. Reaktionspartner spielen, als Basis für die Modellierung von sekundären Aerosolen relevant. Messungen der Partikelfraktionen PM10 und PM2.5 alleine lassen keinen Schluss auf die klimarelevanten Eigenschaften der Aerosole (Abschnitt 1.2.3 bzw. 2.3.8) zu, sie können jedoch gemeinsam mit anderen Parametern (wetterlagentypische Größenverteilung, chemische Zusammensetzung) dazu dienen, Hinweise auf diese Eigenschaften für deren Verwendung in Modellen zu liefern. Zusätzliche Messkampagnen wären erforderlich, diese Eigenschaften von Aerosolen zu untersuchen.

Wie in der PM Inventur (Abschnitt 2.2.9) dargelegt, ist eine Vielzahl von Quellen – Straßenverkehr, Raumheizung, Industrie, Aufwirbelung infolge von Winterstreuung – für einen Teil der PM10- bzw. PM2.5-Konzentrationen verantwortlich. Darüber hinaus stellen sekundäres anorganisches und organisches Aerosolmaterial (Ammoniumsulfat, Ammoniumnitrat, SOA) einen wesentlichen Anteil dar. Für Wien 1999/2000 ergaben z. B. Messungen im Rahmen der AUPHEP Studie (Puxbaum et al., 2004) einen Anteil von sekundärem anorganischen und sekundärem organischen Material von 25 % bzw. 23 % (PM2.5). Aufgrund seiner hohen atmosphärischen Lebensdauer kann Feinstaub über hunderte Kilometer transportiert werden, aus diesem Grund spielt Ferntransport – vor allem aus Quellgebieten im östlichen Mitteleuropa – auch für Österreich eine bedeutende Rolle.

Die Emissionen von PM10 in Österreich nahmen in den letzten 20 Jahren leicht ab. Die meteorologischen Verhältnisse beeinflussen wesentlich die Ausbreitungsbedingungen, die vor allem im Winter wesentlich für die hohen beobachteten Konzentrationen sind. Die von Jahr zu Jahr variable Häufigkeit von ungünstigen Wetterlagen im Winter ist der Hauptfaktor für die Entwicklung der PM10-Konzentrationen in den letzten Jahren, die einer langfristigen Abnahme überlagert ist (Abbildung 2.6).

2.3.4 Anzahlkonzentrationen und Größenverteilungen von Partikeln

Für klimatische Fragen bzw. für Fragen, die den Strahlungshaushalt des Systems Erde/Atmosphäre betreffen, ist neben der chemischen Zusammensetzung (siehe Abschnitt 2.3.5) die Größenverteilung der Partikel interessant, und zwar als Anzahl der Partikel pro Volumen als Funktion der Partikelgröße. Diese Anzahlgrößenverteilung ist aus PM10- bzw. PM2.5-Konzentrationen nicht ableitbar, kann jedoch aus Massengrößenverteilungen berechnet werden.

Weder Anzahlgrößenverteilungen noch Gesamtpartikelkonzentrationen des atmosphärischen Aerosols werden in Europa derzeit routinemäßig gemessen, allerdings wird sich diese Situation durch das neue EU Netzwerk ACTRIS verändern. Putaud et al. (2010) bzw. Reddington et al. (2011) geben ei-

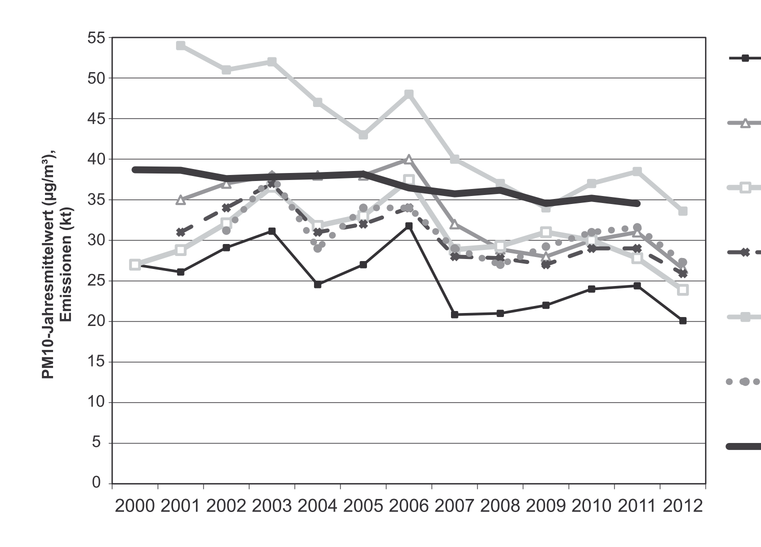


Abbildung 2.6 Trend der PM10-Jahresmittelwerte an ausgewählten Messstellen in Österreich (1985–2012) sowie der PM10-Emissionen in Österreich (Umweltbundesamt, 2013)

Figure 2.6 Trend of PM10 emissions and annual average PM10 concentrations at selected Austrian monitoring sites (1985–2012) (Umweltbundesamt, 2013)

nen Überblick über gemessene Anzahlkonzentrationen in Europa. Ein Überblick über gemessene Größenverteilungen wurde von Asmi et al. (2011) publiziert, jedoch fehlen in diesen Publikationen Daten aus Österreich.

In Österreich gibt es seit ca. 30 Jahren Messungen der Massengrößenverteilung, die jedoch wegen des großen Aufwandes nur selten über einen längeren Zeitraum durchgeführt wurden. Nur wenige dieser Messserien wurden auch publiziert. Eine Ausnahme bildet dabei die AUPHEP Studie (Hauck et al., 2004), in der zusätzlich zu PM auch die Massengrößenverteilung und die chemische Zusammensetzung als Funktion der Partikelgröße an verschiedenen Orten (Wien, Streithofen, Graz, Linz) gemessen wurden. Dabei fand sich an allem Messstellen eine trimodale Massengrößenverteilung mit einem Hauptmode bei ca. 0,4 µm mittlerem Durchmesser, der ca. 70 % zur PM2.5 Konzentration beiträgt (Berner et al., 2004). Weitere Langzeitstudien in Österreich (Burkart et al., 2011, Borsos et al., 2012 und Palmetshofer, 2012) geben einen Überblick sowohl über typische Anzahlkonzentrationen als auch Informationen über Partikelneubildungsepisoden in Wien. Die Anzahlkonzentration des atmosphärischen Aerosols hat ihr Maximum bei Größen unter 100 nm und fällt zu großen Partikelgrößen hin stark ab. Nur ca. 10 % aller Partikel mit Größen zwischen 0,01 und 1 µm liegen im Bereich >200 nm, und der Anteil von Partikeln >1 µm an der Anzahlkonzentration ist zu vernachlässigen (Burkart et al., 2010). Die Massenkonzentration von PM10 oder PM2.5 wird vor allem von Partikeln mit Größen über 0,1–1 µm dominiert. Da jedoch Partikel unter 1 µm wegen ihrer optischen Eigenschaften die Klimarelevanz eines Aerosols bestimmen, bedeutet dies, dass die Massenkonzentration von PM10 oder PM2.5 ohne Wissen über die Anzahlgrößenverteilung kaum Aussagen über diese Klimarelevanz ermöglicht.

2.3.5 Quellenabhängige chemische Zusammensetzung des Aerosols

Die chemische Zusammensetzung des atmosphärischen Aerosols gibt einerseits Auskunft über Quellen und Quellstärken sowie über chemische Umwandlungen von Partikeln in der Atmosphäre und sie ist andererseits für die Berechnung der klimarelevanten Eigenschaften des Aerosols wichtig, da sowohl seine hygroskopischen als auch seine optischen Eigenschaften von der chemischen Zusammensetzung abhängen. Die Identifikation von Quellen bietet darüber hinaus eine Basis für Maßnahmen, die Belastung mit gesundheits- und auch klimarelevanten Aerosolen zu verringern.

In Österreich wurden mit Hilfe eines „Makro-Tracer"-Modells die wichtigsten Aerosolquellen identifiziert. So konnten die Beiträge der Holzverbrennung, des Straßenverkehrs, von Auftausalz und Mineralstaub sowie von anorganischem und auch organischem Sekundäraerosol für städtische und ländliche Gebiete quantifiziert werden. Informationen über Quellenprofile beziehungsweise Umrechnungsfaktoren finden sich in den Arbeiten von Bauer et al., 2008; Caseiro et al., 2007; Jankowski et al., 2008: Kotianova et al., 2008; Kunit und Puxbaum, 1996; Limbeck et al., 2005; Limbeck et al., 2009; Peng et al., 2010; Schmidl et al., 2008b.

Überschreitungen des Grenzwertes für PM10 treten vorwiegend in der kalten Jahreszeit auf (siehe Abschnitt 2.3.3). Neben den meteorologischen Bedingungen sind dafür (Limbeck et al., 2004) zusätzliche Quellen im Winter verantwortlich (Raumheizung, Winterdienst) sowie die verstärkte Bildung von Ammoniumnitrat bei geringen Temperaturen und hoher Luftfeuchtigkeit. Die drei Quellen Straßenstaub und Auftausalz, Holzverbrennung und der Kfz-Verkehr, sowie anorganisches Sekundäraerosol können als Hauptverursacher einer erhöhten

PM Konzentration beschrieben werden (Bauer et al., 2007a, 2007b; Bauer et al., 2009), wobei die relativen Beiträge regional und zeitlich variabel sind. Holzverbrennung als wichtige Aerosolquelle für primäres und sekundäres organisches Aerosolmaterial in Österreich und Europa (Puxbaum et al., 2007; Pio et al., 2008; Caseiro et al., 2009) ist in Abschnitt 2.2.9 genauer beschrieben. Beim Vergleich von urbanen Gebieten und dem ländlichen Hintergrund zeigte sich, dass hohe Konzentrationen in urbanen Gebieten auch durch einen regionalen Anstieg der Konzentrationswerte bedingt sein können, wobei im ländlichen Hintergrund Holzverbrennung sowie Sekundäraerosol und damit Ferntransport einen großen Beitrag liefern.

2.3.6 Messungen am Sonnblick-Observatorium

Das Sonnblick Observatorium in 3106 m Seehöhe eignet sich als Plattform für luftchemische Messungen im Hintergrund über Zentraleuropa. Besonders in den Wintermonaten repräsentieren die Messungen die freie Troposphäre. Ferntransport von Luftmassen kann während des gesamten Jahres beobachtet werden. Aerosolmessungen am Sonnblick wurden hinsichtlich des direkten Effekts auf den Strahlungshaushalt (Iorga et al., 2007) und der Wolkenbildung (Kasper-Giebl et al., 2000; Hitzenberger et al., 2000a) untersucht (siehe auch Abschnitt 2.3.7 und 2.3.8).

Abbildung 2.7 zeigt eine Zeitreihe der bisher am Sonnblick gemessenen Monatsmittelwerte anorganischer Ionen (Sulfat, Nitrat und Ammonium), in der vor allem für Sulfat eine leichte Abnahme der Konzentrationswerte zu erkennen ist, die sich auch im Verlauf der Konzentrationswerte der Inhaltsstoffe der nassen Deposition widerspiegelt (Leder, 2008).

Die Zunahme der Konzentrationswerte in der warmen Jahreszeit ist maßgeblich vom stärkeren Vertikalaustausch in diesen Monaten geprägt. Auch im Sommer werden manchmal sehr geringe Tagesmittelwerte gemessen, die teils auf Auswaschprozesse während Niederschlagsereignissen zurückzuführen, aber auch durch den Herantransport oder das Absinken von sauberen Luftmassen bedingt sind. Die durchwegs geringen Konzentrationen im Winter zeigen, dass sich das Observatorium in dieser Zeit verstärkt im Einflussbereich der freien Troposphäre befindet. Unterschiede im Jahresgang zwischen Nitrat und Sulfat lassen sich mit dem semivolatilen Verhalten von Ammoniumnitrat erklären. Bei höherer Temperatur, d.h. in den Monaten Juni bis August, wenn für Sulfat erhöhte Konzentrationswerte gemessen werden, liegt vornehmlich gasförmige Salpetersäure und weniger partikuläres Nitrat vor.

Seit 2005 wird am Sonnblick auch Kohlenstoff im Aerosol gemessen, der ähnliche Jahresgänge und Konzentrationen aufweist wie Sulfat. Organisches Material (OM) trägt den größten Beitrag zum Gesamtkohlenstoff (TC) bei. Etwa 10 % des OM kann auf Holzverbrennung zurückgeführt werden (Sommer: 4 %, Winter: 23 %; Puxbaum et al., 2007). Der Beitrag des Pflanzenabriebs (Tracer: Cellulose) am organischen Material lag im Jahresmittel bei 10 % (Sanchez-Ochoa et al., 2007). Im Rahmen des CARBOSOL Projektes wurde auch noch der Beitrag an „Humic Like Substances“ (HULIS) bestimmt, die vornehmlich zum sekundären organischen Aerosol zählen und am Sonnblick etwa 10 % des OM darstellen. Für den Beitrag durch HULIS wurde kein deutlicher Unterschied zwischen den Winter- und den Sommermonaten gefunden (Feczko et al., 2007). Der Anteil von Ruß liegt am Sonnblick bei etwa 10 % des TC (Hitzenberger et al., 2000a).

Die Bestimmung der Aerosolmassenkonzentration erfolgte zunächst als Wochenmittelwert in den Jahren 2006 und 2007 mit Monatsmittelwerten von 2–12 µg/m³. Während eines Transportereignisses von Saharastaub (15. bis 21. Juni 2006) wurde eine Staubkonzentration von 43 µg/m³ (Wochenmit-

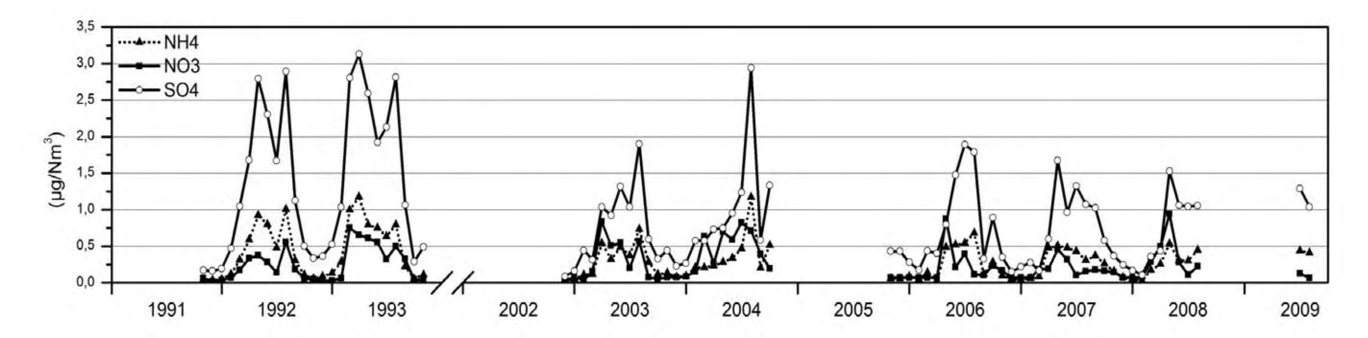


Abbildung 2.7 Zeitverlauf der Monatsmittelwerte für partikelförmiges Sulfat, Nitrat und Ammonium am Sonnblick Observatorium für die Jahre 1991 bis 2009. Daten aus: Kasper und Puxbaum (1998); Sanchez-Ochoa und Kasper-Giebl (2005); Effenberger et al. (2008)

Figure 2.7 Temporal variation of monthly mean values of particulate sulphate, nitrate and ammonium at the Sonnblick observatory for 1991–2009. Data from: Kasper and Puxbaum (1998); Sanchez-Ochoa and Kapser-Giebl (2005); Effenberger et al. (2008)

telwert) gemessen. Seit November 2011 liegen kontinuierliche Bestimmungen der Massenkonzentration vor.

Neben den Aerosolmessungen wird auch die Konzentration von atmosphärischem CO_2 seit 1999 und seit 2012 auch die Konzentration von CH_4 am Sonnblick im Rahmen des Global Atmosphere Watch-(GAW)-Programmes der WMO gemessen (siehe Band 1, Kapitel 5). Die Konzentration von CO_2 ist im Winter aufgrund höherer Emissionen und geringerer Aufnahme durch Pflanzen um etwa 15 ppm höher als im Sommer. Die Jahresmittelwerte stiegen kontinuierlich von 369 ppm (2001) auf 388 ppm (2009) an.

2.3.7 Ruß und brauner Kohlenstoff im Aerosol und Wolkenwasser

Ruß (hier als „Black Carbon", BC, bezeichnet) stammt vor allem aus der Verbrennung von fossilen Brennstoffen, während „brauner Kohlenstoff" (BrC, z. B. Andreae und Gelencser, 2006) vor allem bei der Verbrennung von Biomasse freigesetzt wird (Abschnitt 2.2.10). Die Messung von BC stellt weiterhin eine große Herausforderung dar, da es keine allgemein anerkannte Standardmethode gibt. Vergleichsmessungen in Wien zeigten gute Übereinstimmung der Methoden im Sommer, wenn Dieselruß dominiert (Hitzenberger et al., 2006a). Im Winter beeinflusst die Anwesenheit von Holzrauch und damit BrC die Methoden derartig, dass sich ihre Ergebnisse um Faktoren bis zu 7 unterscheiden können (Reisinger et al., 2008). BrC kann unter bestimmten Bedingungen BC aus Verkehrsquellen deutlich übersteigen. So enthielt das Aerosol in einer Episode mit Biomassefeuern bis zu 26-mal mehr BrC als BC (Wonaschütz et al., 2009). Diese Unsicherheiten müssen bei Konzentrationsvergleichen stets berücksichtigt werden.

Langzeittrends in Europa zeigen einen deutlichen Rückgang der BC Konzentrationen seit den 1950er Jahren, sowie eine Stabilisierung in den 1990er Jahren. Die mittlere Rußkonzentration sank z. B. von 1970 bis 2002 um Faktoren von 4 (Kopenhagen) bis 8 (Manchester) ab, wobei der Hauptteil der Abnahme vor 1990 stattfand. (Hitzenberger and Tursic, 2009). Die Arbeit von Putaud et al. (2010) enthält auch BC Daten aus Österreich. Längere Messreihen wurden für Österreich vor der routinemäßigen Bestimmung im Hintergrundaerosol durch das Umweltbundesamt (seit 2010) nur von Hitzenberger (1993) und Hitzenberger et al. (1996) durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass die BC Konzentration von den 1980er Jahren bis zur Mitte der 1990er Jahre trotz Halbierung der PM Konzentrationen etwa gleich hoch blieb. Dieser Trend ließ sich auf die damals erfolgende Zunahme der Zahl der Diesel-PKW erklären.

Die Massengrößenverteilung von BC unterscheidet sich deutlich von der des Gesamtaerosols, sie weist einen kleineren mittleren Durchmesser auf (z. B. Wien Winter: 0.38 µm für BC, 0,48 für Sulfat). BC kommt im Größenbereich > 2 µm nur in sehr geringem Ausmaß vor (Hitzenberger et al., 2006b). Im Bereich < 100 nm zeigt sich oft ein zusätzlicher Mode mit mittleren Durchmessern um 0,09 µm durch frische Verkehrsemissionen (Berner et al., 1996).

Der Einfluss von Holzverbrennung wurde in einer Studie von Caseiro et al. (2009) für verschiedene Gebiete in Österreich untersucht. Der Beitrag von Holzrauch zum organischen Kohlenstoff (OC) im Aerosol lag dabei zwischen einem Drittel und 70 %, der Beitrag zu PM10 zwischen 7 und 23 %. Die höchsten Anteile wurden in ländlichen Gebieten in der Heizperiode gemessen. In österreichischen Gebirgstälern kann der Beitrag von Holzrauch an PM10 in Einzelepisoden bis über 50 % ausmachen (Bauer et al., 2010).

Da Aerosolpartikel auch als Wolkenkondensationskerne (CCN) fungieren können, gelangt Ruß über intern gemischte CCN auch ins Wolkenwasser. Die „scavenging efficiency" von BC (d. h. der Anteil des BC, der in den Tropfen zu finden ist) ist geringer als die von Sulfat (im Mittel 54 % gegenüber 78 % auf der Rax in 1 680 m Seehöhe: Hitzenberger et al., 2001), jedoch gelangt auf diese Weise ein nicht vernachlässigbarer Teil des BC ins Wolkenwasser. Auf der Rax lagen die Konzentrationen im Mittel bei 1,35 µg / ml (± 0,68), was etwa einem Drittel der Konzentration von Sulfat entspricht. Die BC Konzentrationen im Schnee, die seine Albedo beeinflussen können, waren während dieser Studie deutlich geringer (0,53 ± 0,15 µg / ml).

2.3.8 Beobachtung des direkten Effekts von Aerosolen und Wolkenkondensationskernen in Österreich

Die Prozesse der Aktivierung von CCN zu Wolkentröpfchen (d. h. die Bildung von Tröpfchen an den CCN) sind seit langem bekannt (z. B. Zusammenfassung bei McFiggans et al., 2006), allerdings gibt es noch offene Fragen. Trotz vieler Messkampagnen gibt es weltweit nur zwei Arbeiten, in denen CCN über einen langen Zeitraum (> 1 Jahr) untersucht wurden. Die eine Langzeitstudie (Juranyi et al., 2011; Mai 2008 bis Sept. 2009) fand in der Schweiz statt und die andere in Wien (Burkart et al., 2011; Mai 2007 bis Sept. 2008). Daten aus kürzeren Messkampagnen in Österreich liegen noch für den Sonnblick (3 106 m Seehöhe, Herbst 1995 und Sommer 1996; Hitzenberger et al., 1999) und die Rax (1 680 m Seehöhe; Hitzenberger et al., 2000b) vor.

Aus den Langzeitmessungen in Wien (Burkart et al., 2011) ergibt sich, dass die CCN Konzentrationen (bei 0,5 % Übersättigung) zwischen 160 / cm³ und 3 600 / cm³ mit einem Mittelwert von 820 / cm³ liegen. Die CCN Konzentrationen zeigen zu jeder Jahreszeit starke Schwankungen, die vor allem durch unterschiedliche meteorologische Situationen gegeben sind (stabile Wetterlagen, Frontdurchgänge). Im Gegensatz zur Anzahlkonzentration des Gesamtaerosols zeigen die CCN Konzentrationen keine Tagesgänge, was darauf hinweist, dass sie nicht durch lokale Quellen bestimmt sind sondern dem gealterten regionalen Aerosol angehören. Die CCN machen nur einen sehr kleinen Teil des Aerosols in Wien aus. Im Mittel sind nur 13 % (Min. 2 %, Max. 47 %) der Aerosolpartikel CCN.

Wegen der großen Schwankungen kann auch im Vergleich mit den Messungen in der früheren (kürzeren) Kampagne in Wien 1996, die Konzentrationen zwischen 170 / cm³ und 2 630 / cm³ mit einem Mittelwert von 1 353 / cm³ im Frühling ergaben, kein Trend abgelesen werden.

Eine Untersuchung über das Aktivierungsverhalten (Burkart et al., 2012) ergab, dass weder das Wissen um die chemische Zusammensetzung noch um die Aerosolgrößenverteilung eine mit den Messwerten konsistente Berechnung der CCN Konzentration in der quellnahen Region in Wien erlaubt. Dieses Ergebnis unterscheidet sich signifikant von Messungen im kontinentalen oder maritimen Hintergrund (z. B. Dusek et al., 2006; Hudson, 2007) wo Chemie und Größenverteilung eine weitaus größere Rolle spielen.

In einer früheren Arbeit wurde der direkte Effekt des österreichischen Hintergrundaerosols (Rax, Sonnblick) auf den Strahlungsantrieb untersucht (Iorga et al., 2007). Der hohe Rußgehalt des Aerosols (3,9 bis 6,3 %) auch an den Hintergrundmessstellen ergab in jedem Fall einen positiven Antrieb, der mit zunehmender Oberflächenalbedo zunahm. Für 90 % relative Feuchte ergab sich ein Strahlungsantrieb zwischen +0,16 W / m² (Albedo: 0,35, d. h. alter Schnee) und +11,63 W / m² (Albedo: 0,8, d. h. frischer Schnee) für das Sonnblickaerosol. Für das Aerosol auf der Rax lagen die entsprechenden Werte bei 0,6 W / m² und 4,52 W / m².

Auch der indirekte Effekt des österreichischen Hintergrundaerosols (Rax) wurde in einer Modellstudie untersucht (Neubauer, 2009). Je nach Oberflächenalbedo, Wolkendicke und Wolkenhöhe ergab sich dabei ein negativer Strahlungsantrieb, der mit zunehmender Wolkendicke stärker wurde. Ruß im Wolkenwasser (siehe oben) schwächte den negativen Strahlungsantrieb der anthropogen beeinflussten Modellwolken zwar ab, aber der Antrieb blieb trotzdem negativ.

2.3.9 Stratosphärisches Ozon und Klima

Der Großteil des atmosphärischen Ozons (ca. 90 %) befindet sich in der Stratosphäre in Höhen zwischen 15 und 55 km mit einem von der geographischen Breite und der Jahreszeit abhängigen Maximum zwischen 20 und 25 km. Die Fähigkeit von Ozon, UV-Strahlung zu absorbieren, ist zum Schutz der Lebensprozesse auf der Erde essentiell. Die Energie dieser Strahlung wird in Wärme umgewandelt und bewirkt, dass die Temperatur in der Stratosphäre mit der Höhe zunimmt und sich dadurch eine stabile Schichtung bildet, welche stärkere vertikale Luftbewegungen begrenzt. Aufgrund der vielfältigen Wirkung des stratosphärischen Ozons hat eine Ozonabnahme mehrere Konsequenzen. Die stark gestiegenen THG-Konzentrationen verursachten neben der Erwärmung der Troposphäre eine Kühlung der Stratosphäre. Die Abkühlung der Stratosphäre in den 1980er und 1990er Jahren ist aber auch auf die Abnahme der stratosphärischen Ozonmenge als Folge der Zerstörung durch FCKWs (Shine et al., 2003; Eyring et al., 2006) zurückzuführen. Dieser Temperaturtrend wird auch durch natürliche Vorgänge in der Atmosphäre, zum Beispiel den elfjährigen Sonnenaktivitätszyklus oder starke Vulkanausbrüche, modifiziert (Dall'Amico et al., 2010).

Abbildung 2.8 zeigt den Verlauf der Jahresmittelwerte der Ozonsäule am Hohen Sonnblick seit 1994 sowie die seit 1970 in Arosa gemessenen Werte, die im Jahresmittel von den Werten am Sonnblick um ca. 4 DU (Dobson units, eine Maßeinheit für die Ozonkonzentration) abweichen. Große Schwankungen von Jahr zu Jahr sind erkennbar. Die außergewöhnlich hohen Ozonwerte 2010 sind durch gleichzeitiges Auftreten ungewöhnlicher Wetterlagen erklärbar (stabile negative Phase der Nord-Atlantik-Oszillation = NAO, Quasi-Zweijährige-Oszillation = QBO) (Steinbrecht et al., 2011). Das Jahr 2011 ist dagegen durch einen äußerst kalten und stabilen arktischen Polarwirbel mit ausgedehnten polaren Stratosphärenwolken (polar stratospheric clouds, PSCs) gekennzeichnet. Dies bewirkte im Frühjahr 2011 einen extremen Ozonabbau über der Arktis ähnlich dem Ozonloch über der Antarktis (Manney et al., 2011).

Wegen der weiter steigenden THG-Konzentrationen wird erwartet, dass sich die Stratosphäre durch Strahlungseffekte weiter abkühlt (IPCC, 2013). Niedrige stratosphärische Temperaturen führen zu einer Verlangsamung einiger Gasphasenreaktionen, die Ozon abbauen (WMO, 2007). Anderseits verstärkt sich die Ozonzerstörung in der unteren polaren Stratosphäre durch verstärkte Aktivierung von Halogenverbindungen in PSCs. Darüber hinaus wird sich bei einem Klimawandel auch die Dynamik der Stratosphäre verändern. Derzeit

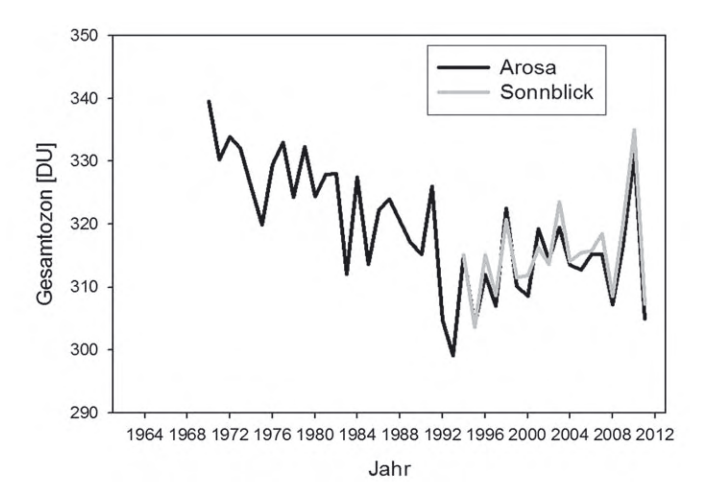


Abbildung 2.8 Jahresmittelwerte der gemessenen Ozonsäule in Dobson Units in Arosa und am Hohen Sonnblick seit 1994. Nach Simic et al. (2009)

Figure 2.8 Annual mean of total ozone in Dobson Units at Arosa and Hoher Sonnblick since 1994. Adapted from Simic et al. (2009)

gibt es noch große Unsicherheiten und keine eindeutigen Hinweise auf eine durch Klimawandel geänderte stratosphärische Zirkulation (Dameris et al., 2007). Über Strahlungsprozesse und dynamische Rückkopplungen tragen Veränderungen der Ozonschicht zudem selbst zu einer Klimaänderung bei. Die Abschätzungen der zukünftigen Entwicklung der Ozonschicht sind mit großen Unsicherheiten behaftet, da die Interaktion von Chemie, Dynamik und Strahlung erst vollständig verstanden und quantifiziert werden muss (WMO, 2007).

Dem letzten Bericht der WMO (2011) zufolge wird erwartet, dass sich etwa Mitte des 21. Jahrhunderts die Ozonschicht wegen der erfolgreichen Regulierung von FCKW nahezu vollständig erholt haben wird. Durch die zunehmenden Konzentrationen von N_2O in der Stratosphäre und dessen Potential zur Ozonzerstörung könnte die Erholung jedoch gefährdet sein (Ravishankara et al., 2009), was weitere Beobachtungen sinnvoll scheinen lässt. Die langjährige Gesamtozonmessreihe vom Hohen Sonnblick trägt wesentlich zu unserem heutigen Verständnis der Ozonschicht über Österreich bei und hilft beim besseren Verständnis zukünftiger Veränderungen.

2.4 Qualitätssicherung
2.4 Quality assurance

2.4.1 Analyse der Unsicherheiten von Treibhausgasinventuren

Die von einzelnen Staaten offiziell eingereichten nationalen Inventuren an THG dienen als Grundlage einer Reihe von wissenschaftlichen und insbesondere administrativen bzw. politischen Entscheidungen. Da hohe Erwartungen in die Zuverlässigkeit und Robustheit dieser Daten gesetzt werden, wurde eine Unsicherheitsanalyse als ein verpflichtendes Element der Qualitätssicherung nationaler Inventuren eingebaut. Somit ist dieser Datensatz einer von wenigen, die routinemäßig von quantitativen Unsicherheitsbestimmungen begleitet werden. Der wissenschaftliche Qualitätsanspruch ist hier aufgrund der hohen Anforderungen an die verwendeten Daten auf operativ erhobene Datensätze übertragen worden.

Die österreichische THG-Inventur war eine der ersten, die auf diese Weise untersucht wurde (Winiwarter und Rypdal, 2001). Weitere Publikationen zu dem Thema (Winiwarter, 2007; Winiwarter und Muik, 2010) geben Aufschluss über wesentliche Eigenheiten von solchen Analysen. Nicht nur wesentliche Ergebnisse, sondern auch die wichtigsten Fehlerquellen und Sensitivitäten können herausgelesen werden, und das nicht nur für Österreich, sondern auch im Vergleich mit einer Reihe von anderen Ländern.

Für die Anforderungen des UNFCCC reicht die einfache Fehlerfortpflanzung nicht aus. Eine detaillierte Untersuchung, durch Verwendung von statistischen Methoden (Monte-Carlo Verfahren), ermöglicht die genaue Untersuchung von Sensitivitäten und Zusammenhängen zwischen diversen Eingangsdaten und dem Ergebnis der Analyse. Abbildung 2.9 zeigt das Ergebnis einer Analyse, die Verteilung der Wahrscheinlichkeit von möglichen Ergebnissen der österreichischen THG-Inventur. Es wird durch die statistische Analyse deutlich, dass die möglichen Emissionen (ohne Berücksichtigung der Kohlenstoffsenken) bei 90 000 oder bei 100 000 kt CO_2-Äq. liegen können und nicht notwendigerweise genau dem Mittelwert von 93 257 kt CO_2-Äq. entsprechen.

Die methodische Vorgangsweise zur Erfassung der Unsicherheiten erfolgt immer auf ähnlichem Weg: zunächst erfolgt eine Sammlung von (möglichst statistisch unabhängigen) Grunddaten mit Aussagekraft über den Schwankungsbereich der Eingangsdaten für eine Inventur (statistische Kennzahlen, Emissionsfaktoren). Strukturierte Experteninterviews treten an Stelle von konkreten Messergebnissen, wo solche

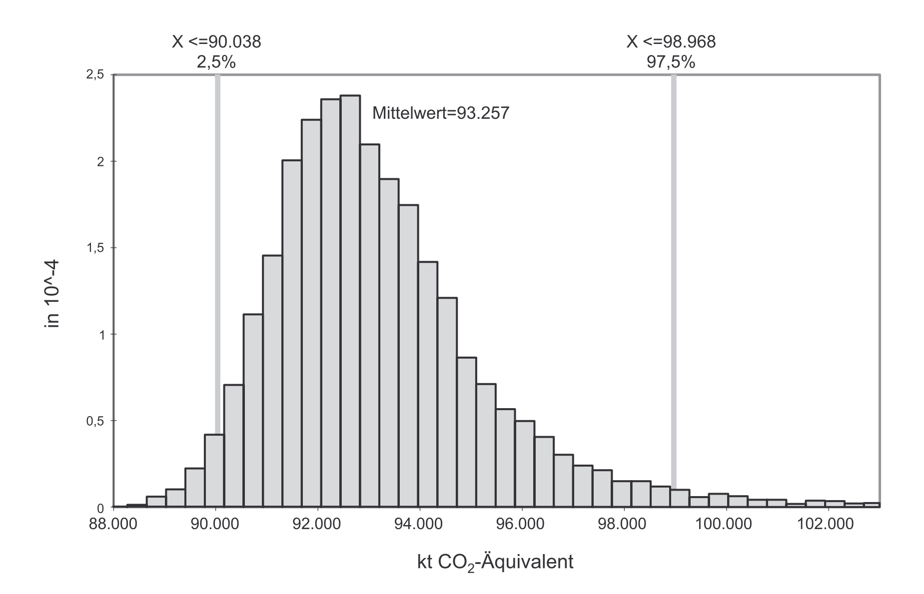


Abbildung 2.9 Wahrscheinlichkeitsverteilung der österreichischen THG-Inventur 2005, ohne Landnutzungsänderung (Winiwarter 2008)

Figure 2.9 Probability distribution of the Austrian greenhouse gas inventory 2005 without changes in land use (Winiwarter, 2008)

nicht verfügbar sind. Mit diesen Eingangsdaten, möglichst auf der detailliertesten Ebene die auch für die Berechnung der Inventur verwendet wird, wird die Monte-Carlo Analyse gestartet und 10 000 zufällige Proben der Eingangsparameter (gemäß der ermittelten Ursprungsverteilungen) gezogen und zu 10 000 Einzelergebnissen verarbeitet. Aus diesen Ergebnissen wird die Verteilung (siehe Abbildung 2.9) berechnet, aber auch die statistischen Zusammenhänge zu den Eingangsdaten ermittelt.

Die Ergebnisse und Interpretationen dieser für Österreich durchgeführten Analyse (Winiwarter und Muik, 2010) sind auf strukturell ähnliche Staaten gut übertragbar. So zeigte sich, dass aus einer beträchtlichen Zahl an einzeln erhobenen Eingangsdaten nur sehr wenige relevant für die Gesamtunsicherheit des Ergebnisses sind. Dies bedeutet umgekehrt, dass die Unsicherheiten der meisten Parameter, die in eine Emissionsinventur eingehen, praktisch keine Rolle für die Gesamtunsicherheiten spielen.

Quellen, deren Emissionsverhalten gut verstanden wird, liefern tendenziell nur geringe Beiträge zur Gesamtunsicherheit. Dies betrifft etwa die Emissionen von CO_2 bei der Verbrennung fossiler Energieträger, sogar wenn diese Beiträge für die Gesamtemissionen ganz wesentlich sind.

Große Beiträge zur Gesamtunsicherheit findet man bei geringen Emissionsraten über großen Flächen – insbesondere ist die Freisetzung von N_2O im landwirtschaftlichen Bereich praktisch immer der wesentliche Träger der Gesamtunsicherheit. Verbesserungen in der Abschätzung dieser einen Emissionsquelle allein (die typisch weniger als 5 % der Gesamtemissionen eines Industrielandes bewirkt) könnten die Unsicherheiten deutlich reduzieren. Somit trägt die Unsicherheitsanalyse wesentlich dazu bei, Schwerpunkte bei der Weiterentwicklung von THG-Inventuren zu setzen.

Allerdings sind die quantitativen Ergebnisse von Unsicherheitsabschätzungen verschiedener Länder nur bedingt vergleichbar. Die Abschätzung der Unsicherheiten wird auch bei Verwendung gleicher Methoden (Literaturquellen, Verfahren zur Durchführung einer Expertenbefragung) von subjektiven Einschätzungen der Ergebnisse mitbestimmt – insbesondere bei jenen Quellen die besonders stark zur Unsicherheit beitragen (siehe Winiwarter und Muik, 2010).

2.4.2 Validierung von Inventuren mit Hilfe meteorologischer Modelle

Grundlagen der inversen Modellierung

Die Konzentration von Spurenstoffen in der Luft hängt einerseits von den Emissionen dieser Substanzen in die Atmosphäre ab, andererseits von ihrer Verteilung und Umwandlung in der Atmosphäre. THG sind durch eine lange atmosphärische Lebensdauer gekennzeichnet und somit weniger atmosphärischen Umwandlungsprozessen unterworfen als andere Spurenstoffe. Durch Kombination eines raum-zeitlichen Emissionskatasters bzw. Emissionsmodells mit atmosphärischen Transportmodellen, die als „Nebenprodukte" der operationellen Wettervorhersage verstanden werden können (z. B. FLEXPART, Stohl et al., 2009 oder TM5, Krol et al., 2005) lassen sich somit die Verteilungen von Spurenstoffen in der Atmosphäre als Funktion von Raum und Zeit berechnen.

Wenn nun Messdaten vorhanden sind, welche die raumzeitliche Variabilität der Spurenstoffe darstellen, können die

Modellergebnisse mit den Messungen verglichen werden. Durch Veränderungen der Eingangsdaten (Emissionsdatensatz) kann die Übereinstimmung zwischen den beiden Datensätzen verbessert werden. Inverse Modellierung ist dann ein Optimierungsverfahren, das eine optimale Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung für die resultierenden Konzentrationen in der Luft erreicht.

In Abhängigkeit von den genauen Anforderungen wurden verschiedene Methoden der inversen Modellierung entwickelt. Ihre Grundlage ist stets eine Modellierung der atmosphärischen Transporte, welche die quantitative Beziehung zwischen Emissionen (Quellen bzw. Nettoflüssen) und Immissionen (Konzentration an Messstellen oder vertikale integrierte Konzentrationen wie sie von Satellitendaten extrahiert werden können) herstellen. Zudem können Verlustprozesse wie etwa der Abbau von Methan durch Reaktion mit OH-Radikalen berücksichtigt werden. Weiters wird eine mathematische Formulierung für eine „optimale Übereinstimmung“ benötigt. Hier kommt vor allem der Beschreibung der Unsicherheiten und Fehler eine große Bedeutung zu, denn bei einer Beobachtung bzw. Simulation mit geringen potentiellen Fehlern wird man eine größere Übereinstimmung verlangen als bei einer mit großem potentiellen Fehler. In der Regel können Informationen aus bestehenden Emissionsdaten verwendet werden. Um zu einem möglichst guten Ergebnis zu gelangen, ist man bestrebt, diese als erste Annäherung („first guess“ oder „a priori“) mit einzubeziehen. Naturgemäß ist auch eine Quantifizierung der Unsicherheit dieser Emissionsdaten notwendig (Jonas et al., 2010), denn die inverse Modellierung optimiert zwischen der Beibehaltung der „First guess“-Daten und einer Anpassung der Ergebnisse an die Beobachtungen. Bisweilen werden traditionelle Emissionsabschätzungen aus der Synthese von Daten über die einzelnen Quellen als „bottom-up“ und Ergebnisse inverser Modellierung als „top-down“ Emissionsdaten bezeichnet.

Räumliche und zeitliche Skalen

Um das Potential der inversen Modellierung zu beurteilen, ist es wichtig, die Rolle der räumlichen und zeitlichen Skala der Datenvariabilität zu kennen. Beide stehen in Verbindung: je länger die Mittelungszeiträume der Beobachtungen, desto großräumiger ist die enthaltene Information, je kürzer hingegen, umso detailliertere Rückschlüsse lassen sich ziehen. Aus Monats- oder Jahresmittelwerten kann man auf globale, hemisphärische oder kontinentale Emissionen schließen. Umgekehrt, wenn Emissionen auf der Skala einzelner europäischer Staaten gefragt sind, benötigt man Messungen mit Tages- oder Stundenauflösung. Hier ist wichtig, welche Gebiete eine Luftmasse in den vorangegangen Stunden bis wenigen Tagen überstrichen hat. Große Skalen sind leichter zu modellieren und kommen mit einer geringeren Dichte der Messungen aus. Allerdings dürfen diese Daten dann auch nicht lokal beeinflusst sein.

Aufgrund dieser Gegebenheiten wurde mit der inversen Modellierung zunächst auf globaler Skala begonnen, mit Daten so genannter Hintergrundstationen, die bevorzugt auf Inseln fernab der Emissionsgebiete liegen (Hawaii, Teneriffa, Spitzbergen, Westküste Irlands, Tasmanien, etc.). In den letzten Jahren werden mehr und mehr auch so genannte regionale Inversionen entwickelt. Allerdings ist die Datenlage dafür noch nicht befriedigend (siehe z. B. Villani et al., 2010), und auch die Qualität der Ausbreitungsmodelle ist ein begrenzender Faktor. Um auch in dichter besiedelten Weltregionen Messdaten mit begrenztem lokalen Einfluss zu erhalten, werden Stationen bevorzugt auf Messtürmen (mindestens 100 m Höhe über Grund) oder Berggipfeln errichtet, wie z. B. in Österreich auf dem Sonnblick. Für die komplexe Topographie von Bergstationen ist jedoch die Ausbreitungsmodellierung noch zu grob, daher wird bevorzugt auf Türme als Standorte von Messungen zurückgegriffen. Das Netzwerk „Tall TOwer and surface Research Network for verification of Climate relevant emissions of Human origin in Europe“ (TTORCH, vgl. Seibert, 2010) der European Science Foundation unterstützt die Entwicklung und Nutzung dieser Messdaten.

Anwendung auf verschiedene Spurenstoffe

Die atmosphärische Bilanz von CO_2 ist nicht nur von den anthropogenen Emissionen durch Verbrennungsvorgänge abhängig. Vielmehr stellen die Aufnahme und Abgabe von CO_2 durch die Vegetation große Stoffflüsse zwischen Atmosphäre und Biosphäre dar, die noch dazu räumlich und vor allem zeitlich (Tag/Nacht, Jahreszeiten) sehr variabel sind. Auch die Aufnahme durch den Ozean ist ein wichtiger Faktor. Diese Flüsse sind weit weniger genau bekannt als die anthropogenen Emissionen. Inverse Modellierung wird hier vor allem für die bessere Quantifizierung dieser Flüsse (auf Englisch „net ecosystem exchange“ oder NEE genannt) eingesetzt (Carouge et al., 2010; Ciais et al., 2010; Tolk et al., 2011).

CH_4 wird durch viele diffuse, nicht leicht quantifizierbare Quellen charakterisiert. Deshalb spielt die inverse Modellierung hier eine wichtige Rolle bei der grundsätzlichen Quantifizierung des Eintrags dieser Substanz in die Atmosphäre und kann auch Fehler in Emissionskatastern aufdecken (Bergamaschi et al., 2005). N_2O gelangt vor allem aus gedüngten

Böden in die Atmosphäre. Inverse Modellierung (Corazza et al., 2011) liefert ähnliche Ergebnisse wie die Emissionsschätzungen, wobei die Unsicherheiten aber als wesentlich geringer eingestuft werden.

FCKW und F-Gase werden von üblichen Emissionsinventuren nur mangelhaft dargestellt, einerseits aufgrund der Zahl an verschiedenen Einzelkomponenten und diversen Anwendungszwecken, andererseits weil die Freisetzung gegenüber der Herstellung häufig verzögert ist (z. B. Einsatz in Feuerlöschanlagen, Kühlaggregaten, Isoliermaterialien). Bisherige Ergebnisse inverser Modellierung (z. B. Stohl et al., 2009 Brunner et al., 2012) zeigen zum Teil beachtliche Unterschiede zu den Emissionsinventuren, die im Übrigen noch sehr lückenhaft sind. Hier kommt der inversen Modellierung eine verhältnismäßig wichtige Rolle zu.

Bewertung und Ausblick

Inverse Modellierung ist inzwischen neben den etablierten „bottom-up“ Verfahren ein wichtiges Werkzeug zur Untersuchung und Quantifizierung von Spurenstoffeinträgen in die Atmosphäre. Die Methodik befindet sich aber weiterhin in Entwicklung. Für die verlässliche Beurteilung von regionalen Verteilungen dieser Einträge für THG gibt es noch keine ausreichende Beobachtungsdatenbasis, und auch die Modelle müssen weiter verbessert werden. Die Interpretierbarkeit der Ergebnisse hängt stark davon ab, wie die Unsicherheiten sowohl der konventionellen „first guess“ Emissionsdaten als auch der Messungen und Simulationen quantifiziert wurden. Die Auflösung der Inversionen hängt außerdem von der Verteilung der Stationen zusammen mit räumlichen Mustern der Emission und den Wetterlagen ab, ist also nicht unbedingt kompatibel mit den national zusammengestellten Emissionsdaten. Dennoch kann sie bereits heute als eine „weiche“ Kontrolle der offiziellen Emissionsdaten dienen – gröbere Abweichungen können in der Regel aufgespürt und zum Teil auch erklärt werden. Da Daten der Messstationen relativ rasch verfügbar sind (und verschiedene Anstrengungen gemacht werden, sie auch in Echtzeit anzubieten) sind Trendaussagen für Emissionen aus inverser Modellierung, wenn sie operationell implementiert sind, deutlich rascher möglich als die offiziellen Emissionsberichte. Ein Beispiel hierfür ist das „Carbon Tracker“-System des US-amerikanischen Wetterdienstes (http://carbontracker.noaa.gov/).

Inverse Modellierung wird die konventionellen Emissionskataster wohl nicht ersetzen, jedoch sollte sie dazu beitragen, ihre Qualität zu verbessern und das Vertrauen in die Emissionsdaten zu stärken. Darüber hinaus kann sie das Verständnis verschiedener Prozesse verbessern und auch auf diesem Weg die Bilanzierung von THG unterstützen. Österreich kann dazu sowohl durch Forschung als auch durch die Bereitstellung oder Unterstützung geeigneter Messinfrastrukturen einen Beitrag leisten.

2.5 Zusammenfassung und Forschungsbedarf
2.5 Summary and compilation of research needs

Wesentliche Aspekte der Eigenschaften, der Konzentrationen und Emissionen jener Spurenstoffe, die Einfluss auf das Klima haben, sind bekannt. In vielen Fällen können daher die Wechselwirkungen, welche die Freisetzung, das Vorkommen und die Auswirkungen dieser Substanzen beeinflussen, gut beschrieben werden. Es gibt jedoch in zahlreichen anderen Bereichen noch Forschungsbedarf, um Zusammenhänge darzustellen, auf denen Maßnahmen aufgebaut werden können.

Für langlebige THG (Verweilzeiten in der Atmosphäre deutlich über ein Jahr) gelten im Wesentlichen die Bestimmungen des Kyoto-Vertrages, in dessen Rahmen Österreich verpflichtet ist, eine jährliche THG-Inventur zu erstellen. Die Erfassung dieser Emissionen von sechs Substanzen bzw. Substanzklassen (CO_2, CH_4, N_2O, PFC, HFC und SF_6) erfolgt im Umweltbundesamt gemeinsam mit weiteren österreichischen ExpertInnen, deren Detailwissen in den vorliegenden Bericht eingeflossen ist.

Die Auswertung der Emissionsdaten zeigt, dass der größte Teil der österreichischen THG-Emissionen (78 %) durch Verwendung von fossilen Energieträgern bedingt ist. Davon entfallen mehr als 22 % auf energetische Umwandlung (Kraftwerke, Raffinerie, Kokerei) und fast 25 % auf die energetische Verwendung in der Industrie. Raumwärmeerzeugung trägt etwa 17 % zu den Emissionen dieser Kategorie bei, der größere Teil (12 % der energetischen Emissionen) davon in Haushalten. Der größte Teil der übrigen energetischen Emissionen (über 35 %) sind dem Verkehr zuzuordnen.

Eine wesentliche Grundlage der Emissionsinventur dieser THG-Kategorie ist damit eine genaue Energiestatistik, insbesondere in Bezug auf fossile Energie. Abgrenzungen zwischen dem energetischen und dem stofflichen Einsatz sind ebenso bedeutend wie die korrekte Umsetzung nationaler Datengrundlagen in die internationalen Regelwerke. Die Minimierung von Doppelzählungen sowie die Vermeidung von Datenlücken sind beträchtliche Herausforderungen bei komplexen Flussbildern und der benötigten Klassifizierung nach unter-

schiedlichen statistischen Erfordernissen. Ein bedeutender Teil der Energie wird im Bereich Verkehr eingesetzt, für den eine parallele Abschätzung des für die nationalen Verkehrsleistungen benötigten Energieverbrauches eine Unterscheidung ermöglicht, welche Anteile der Energieträger im Inland und welche auf Straßen außerhalb Österreichs verwendet werden. Während dieser im Ausland verwendete Anteil (etwa 28 %) definitionsgemäß in der Emissionsinventur zu berücksichtigen ist und daher nicht konkret ausgewiesen werden muss, ist seine genaue Kenntnis etwa für Minderungsmaßnahmen von beträchtlicher Bedeutung.

Im Bereich der Industrie und der Verwendung von klimarelevanten Gasen (insbesondere der fluorierten Gase) können die Emissionen aufgrund von detaillierten Brancheninformationen bestimmt werden. Auffällig sind insbesondere die starken Schwankungen zwischen einzelnen Jahren, welche die punktuellen aber hier relevanten Veränderungen einzelner industrieller Aktivitäten wiedergeben. Die Einstellung der elektrolytischen Aluminiumproduktion im Jahr 1992, die Ausstattung der einzigen Salpetersäureanlage mit Vorrichtungen zur Lachgasreduktion ab 2004 (fast 10 Jahre vor den meisten anderen Anlagen in Europa) oder die Verwendung von SF6 in Schallschutzfenstern oder Sportschuhen (samt des anschließenden Verbots solcher Verwendungen) sind kleine Einzelaspekte, die jedoch für die Gesamtsumme der Emissionen dieses Sektors relevant sind. Wesentlicher Industrieprozess ist die Eisen- und Stahlherstellung, die ohne Berücksichtigung der energetischen Emissionen 6,5 % der österreichischen THG-Emissionen umfasst. Insgesamt werden etwa 13 % der österreichischen THG-Emissionen durch industrielle Prozesse verursacht.

Biogene Prozesse liegen den Emissionen der Bereiche Landwirtschaft, Böden und Abfall zugrunde. Mikrobielle Abbauprozesse im anaeroben, z. T. auch aeroben Milieu führen zur Bildung von Methan (nur anaerob) und Lachgas, welche die wesentlichen THG aus diesen Sektoren darstellen (fast 9 % der Gesamtemissionen). Beide Gase werden auch wesentlich durch die Emissionen dieser Sektoren bestimmt. Biogene Prozesse bewirken auch die Aufnahme von CO_2 in Pflanzen, sodass Bäume und Böden in Wäldern als Kohlenstoffsenken dienen, allerdings mit beschränktem Potential. Zusätzlich sind im Bereich Müllverbrennung CO_2-Emissionen zu berücksichtigen. Dabei ist die Unterscheidung zwischen ursprünglich biogenem Material (muss nicht für die THG-Bilanzen berücksichtigt werden, weil erneuerbar) und fossilem Kohlenstoff im Brennstoff eine Herausforderung, die weitere Forschungsarbeit benötigt.

Aerosolpartikel beeinflussen den Strahlungshaushalt der Atmosphäre durch Streuung und Absorption sichtbaren Lichts (d. h. Strahlung im sichtbaren Bereich des Spektrums) direkt und indirekt durch ihren Einfluss auf Wolkenbildung und die Streu- und Absorptionseigenschaften von Wolken. Für die Abschätzung dieser Effekte sind einerseits Daten über die Konzentration der Partikel und andererseits über ihre Größenverteilung und chemische Zusammensetzung nötig. Partikel im Größenbereich von ca. 50 nm bis 1–2 µm sind dabei am wichtigsten, da diese Partikel sowohl Kondensationskerne (CCN) für Wolkentröpfchen darstellen als auch Licht am stärksten streuen (verglichen mit Partikeln anderer Größe). Ihre Aufenthaltszeit in der Atmosphäre ist im Vergleich zu kleineren und größeren Partikeln deutlich größer und beträgt Stunden bis Tage, weswegen sie durch Ferntransport weit aus den Quellregionen verfrachtet werden können. Bei der Abschätzung des direkten und noch mehr bei der des indirekten Effekts der Aerosole auf die Strahlungsbilanz bestehen noch sehr große Unsicherheiten. Auch IPCC (2013) identifiziert die Modellierung der Aerosoleffekte als ein Gebiet mit großem Forschungsbedarf. Das Wissen über Aerosole, ihre direkte Emission aus anthropogenen Quellen sowie ihre Bildung aus (teils anthropogenen) Vorläufergasen ist nicht so weit fortgeschritten wie das über die wichtigsten THG, sodass hier ein erheblicher Forschungsbedarf besteht.

Die Emissionsinventuren für Aerosole werden für PM10 (Partikel < 10 µm aerodynamischer Durchmesser) und für PM2.5 (Partikel $< 2{,}5$ µm) erstellt und teilweise durch Abschätzungen sekundärer Aerosolbildung ergänzt. Für Klimaüberlegungen sind vor allem die feinen Teilchen (Partikel < 1 µm) interessant, daher wären Weiterentwicklungen von Inventuren auf feinere Größenklassen oder Teilchenanzahl hin wünschenswert.

Für Österreich zeigt sich bei sektoral aufgeschlüsselten Emissionsinventuren, dass die Sektoren Verkehr (Straßenverkehr und sonstiger Verkehr) und Kleinverbraucher (hier meist Heizungsanlagen) den größten Beitrag zu PM2.5 liefern. Diese beiden Sektoren tragen nicht nur gemeinsam mehr als zwei Drittel zu den gesamten PM2.5 Emissionen bei, sondern sie sind auch die fast einzigen Quellen für Strahlung absorbierende Partikel (Dieselruß, Ruß aus Heizungssystemen). Verschiedene Heizungsanlagen können stark unterschiedliche Emissionen aufweisen, sowohl insgesamt als auch in Bezug auf den Rußgehalt im Rauch. Der aus Klimaschutzgründen propagierte Umstieg auf nicht-fossile Brennstoffe (Biomasse) bei Heizungssystemen führt, wenn emissionsarme Systeme wie Gas- bzw. Elektroheizungen ersetzt werden, zu zusätzlichen Emissionen von klimarelevanten Aerosolen. Moderne automatische Heizsysteme (z. B. Pelletheizungen) haben einen sehr geringen PM10 Ausstoß, der fast keinen Ruß (unter 10 % des PM10) enthält. Ältere Scheitholzöfen zeigen deutlich höhere Emissionen sowohl von PM10 als auch Ruß (44–70 %

des PM10). Die optischen und chemischen Eigenschaften des bei der Verbrennung von biogenen Brennstoffen entstehenden Rußes, die für Berechnungen des direkten Aerosoleffekts benötigt werden, sind im Gegensatz zur Situation bei Ruß aus Dieselmotoren durch den „braunen Kohlenstoff" gegeben. Auf dem Gebiet der Messtechnik und Charakterisierung von Ruß und BrC besteht noch erheblicher Forschungsbedarf.

Abgesehen von den Summenparametern PM10 und PM2.5 werden in Österreich auch Größenverteilungen von Aerosolen (sowohl Massen- als auch Anzahlgrößenverteilungen) und Gesamtpartikelkonzentrationen im Hintergrundaerosol (z. B. am Sonnblick) und in urbanen Gebieten (vor allem Wien) in Messkampagnen von wenigen Wochen bis über 1 Jahr Dauer gemessen. Dabei wird oft auch die chemische Zusammensetzung des Aerosols untersucht. Die sekundär in der Atmosphäre aus Vorläufersubstanzen gebildeten anorganischen und organischen Stoffe stellen die Hauptbestandteile des Aerosols dar. Ruß hat einen geringen Anteil an der Aerosolmassenkonzentration (ca. 5 bis max. 10 % je nach Messstelle), ist wegen seines hohen Lichtabsorptionsvermögens jedoch ein wichtiger klimarelevanter Aerosolbestandteil. Bei Bestimmung von Ruß und anderen Aerosolsubstanzen im Wolkenwasser (Messungen auf Rax und Sonnblick) zeigte sich, dass Ruß zwar weniger effizient von Wolkentropfen aufgenommen wird als etwa Sulfate, dort jedoch trotzdem in merklicher Konzentration vorkommt und somit sehr wohl auch das Strahlungsverhalten von Wolken beeinflussen kann.

Zur Verwendung von routinemäßig gemessenen Summenparametern PM10 und PM2.5 für Abschätzungen des klimarelevanten direkten Aerosoleffekts besteht zusätzlicher Bedarf an orts- und wetterlagenspezifischen intensiven Messkampagnen, in denen für Lichtstreuung und Absorption relevante Parameter sowie die chemische Zusammensetzung des Aerosols erhoben werden, die dann mit den PM2.5 oder (weniger geeignet) PM10 Werten skaliert werden könnten. Erst mit Hilfe solcher Parameter können die kontinuierlichen PM2.5- (und evtl. PM10-) Messdaten in Modellen Aufschluss über klimarelevante Aerosoleigenschaften geben.

Für Betrachtungen des Klimaeffekts von anthropogenen Emissionen in Österreich sind nicht nur die Partikel, sondern auch ihre Vorläufersubstanzen und die zur Partikelbildung führenden Mechanismen von großem Interesse. Auch Ozon, selbst ein klimawirksames Gas, ist wegen seiner Rolle in photochemischen Prozessen wichtig. Bodennahes Ozon wird in Österreich von den Messnetzen der Länder und des Bundes erfasst. Die Ozonkonzentration über Österreich wird stark durch großräumige Transportprozesse beeinflusst. Photochemische Prozesse führen auch zur Bildung von Substanzen, die an vorhandenen Aerosolpartikeln kondensieren oder neue Partikel bilden können, wodurch die Größenverteilung und die PM Konzentration beeinflusst werden. Neueste Versuche zeigten, dass organische Vorläufersubstanzen (volatile organische Kohlenstoffverbindungen, VOC) eine wesentliche Rolle bei der Bildung von sekundärem Aerosol spielen. Hier und auch zur Emission und Deposition von VOCs in terrestrischen Ökosystemen besteht ein erheblicher Bedarf an weiteren Forschungsarbeiten. Das derzeitige Verständnis über die reaktive Kohlenstoffbilanz zwischen Biosphäre und Atmosphäre scheint unvollständig und sollte neu überdacht werden.

Ca. 90 % des atmosphärischen Gesamtozons befinden sich in der Stratosphäre. Messungen der Ozonsäule erfolgen seit 1994 auf dem Sonnblick. Auswirkungen des Klimawandels auf die Stratosphäre und die Erholung der Ozonschicht werden heute nur teilweise verstanden, weitere Forschungsarbeiten sind erforderlich, um bessere Aussagen über die zukünftige Entwicklung der Ozonschicht, die auch Einfluss auf die globale Strahlungsbilanz und damit das Klima ausübt, treffen zu können. Das Sonnblick Observatorium ermöglicht die weitgehend von direkten Emissionsquellen unbeeinflusste Bestimmung der Konzentrationen von CO_2 und CH_4. Die mehrjährigen Konzentrationsverläufe von CO_2 entsprechen den globalen Trends.

Qualitätssichernde Maßnahmen für THG-Inventuren beinhalten neben verpflichtender genauer Dokumentation und Ergebniskontrolle durch externe ExpertInnenteams auch die Erfassung der Unsicherheit der Emissionen. Aus diesen Daten kann einerseits ein Verbesserungsbedarf der Emissionsinventuren abgeleitet und andererseits Information über die Verlässlichkeit des Ergebnisses gewonnen werden. So zeigt sich mit der Hauptursache der gesamten Unsicherheit der Inventur, der Emission von N_2O aus Böden, gleichzeitig ein erster Ansatz zu Verbesserungen und damit Forschungsbedarf. Mit Methoden der inversen Modellierung können Emissionsdaten auf Basis von Luftmessungen validiert werden. Solche Messungen konnten in verschiedenen Teilen Europas an entlegenen Messstationen, an hohen Türmen oder unter Verwendung von Satellitendaten mit Erfolg Emissionsdaten gegenübergestellt werden. Für Österreich fehlen jedoch derartige Messungen, die gemeinsam mit einer verbesserten raum-zeitlichen Auflösung der Emissionsinventuren entscheidende weitere Hinweise auf Verbesserungen der Inventur geben könnten.

2.6 Literaturverzeichnis
2.6 References

Ambus, P., Zechmeister-Boltenstern, S., Butterbach-Bahl, K., 2006. Sources of nitrous oxide emitted from European forest soils. Biogeosciences 3, 135–145.

Amon, B., Hörtenhuber, S., 2008. Revision der österreichischen Luftschadstoffinventur OLI für NH, NMVOC und NO_x (Bericht im Auftrag des Umweltbundesamtes). Institut für Landtechnik, Universität für Bodenkultur Wien, Österreich.

Amon, B., Hörtenhuber, S., 2010. Revision of Austria's National Greenhouse Gas Inventory, Sector Agriculture. Final Report on behalf of Umweltbundesamt GmbH. Department für Nachhaltige Agrarsysteme, Universität für Bodenkultur Wien, Österreich.

Amon, B., Fröhlich, M., Weißensteiner, R., Zablatnik, B., Amon, T., 2007. Tierhaltung und Wirtschaftsdüngermanagement in Österreich. (Endbericht No. Projekt Nr 1441). Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Universität für Bodenkultur Wien. Österreich.

Andreae, M.O., Gelencsér, A., 2006. Black carbon or brown carbon? The nature of light-absorbing carbonaceous aerosols. Atmos. Chem. Phys. 6, 3131–3148. doi:10.5194/acp-6-3131-2006

Asmi, A., Wiedensohler, A., Laj, P., Fjaeraa, A.-M., Sellegri, K., Birmili, W., Weingartner, E., Baltensperger, U., Zdimal, V., Zikova, N., Putaud, J.-P., Marinoni, A., Tunved, P., Hansson, H.-C., Fiebig, M., Kivekäs, N., Lihavainen, H., Asmi, E., Ulevicius, V., Aalto, P.P., Swietlicki, E., Kristensson, A., Mihalopoulos, N., Kalivitis, N., Kalapov, I., Kiss, G., de Leeuw, G., Henzing, B., Harrison, R.M., Beddows, D., O'Dowd, C., Jennings, S.G., Flentje, H., Weinhold, K., Meinhardt, F., Ries, L., Kulmala, M., 2011. Number size distributions and seasonality of submicron particles in Europe 2008–2009. Atmospheric Chemistry and Physics 11, 5505–5538. doi:10.5194/acp-11-5505-2011

Bamberger, I., Hörtnagl, L., Ruuskanen, T.M., Schnitzhofer, R., Müller, M., Graus, M., Karl, T., Wohlfahrt, G., Hansel, A., 2011. Deposition fluxes of terpenes over grassland. Journal of Geophysical Research 116. doi:10.1029/2010JD015457

Bauer, H., Marr, I., Kasper-Giebl, A., Limbeck, A., Caseiro, A., Handler, M., Jankowski, N., Klatzer, B., Kotianova, P., Pouresmaeil, P., Schmidl, C., Sageder, M., Puxbaum, H., 2007a. ‚AQUELLA' Steiermark Endbericht. Bestimmung von Immissionsbeiträgen in Feinstaubproben (Endbericht No. Lu-08/07. Auftraggeber: Amt der Steiermärkischen Landesregierung Fachabteilung 17C - Technische Umweltkontrolle Referat Luftgüteüberwachung Landhausgasse 7 8010 Graz).

Bauer, H., Marr, I., Kaspar-Giebl, A., Limbeck, A., Caseiro, A., Handler, M., Jankowski, N., Klatzer, B., Kotianova, P., Pouresmaeil, P., Schmidl, C., Sageder, M., Puxbaum, H., 2007b. AQUELLA Kärnten/Klagenfurt - Aerosolquellenanalysen für Kärnten PM10-Filteranalysen nach dem ‚AQUELLA-Verfahren'. (Endbericht. Im Auftrag von Land Kärnten und der Stadt Klagenfurt mit finanzieller Unterstützung der Europäischen Kommission No. US-Zahl: 436/1699/04). Kärnten.

Bauer, H., Claeys, M., Vermeylen, R., Schueller, E., Weinke, G., Berger, A., Puxbaum, H., 2008. Arabitol and mannitol as tracers for the quantification of airborne fungal spores. Atmospheric Environment 42, 588–593. doi:10.1016/j.atmosenv.2007.10.013

Bauer, H., Kasper-Giebl, A., Limbeck, A., Ramirez-Santa Cruz, C., Jankowski, N., Klatzer, B., Pouresmaeil, P., Dattler, A., Handler, M., Schmidl, C., Puxbaum, H., 2009. AQUELLA Graz Süd PM2.5 Quellenanalyse von PM10- und PM2.5 Belastungen in Graz. (Endbericht No. Lu-03/09. Auftraggeber: Amt der Steiermärkischen Landesregierung Fachabteilung 17C - Technische Umweltkontrolle Referat Luftgüteüberwachung Landhausgasse 7 8010 Graz).

Bauer, H., Kasper-Giebl, A., Jankowski, N., Pouresmaeil, P., Ramirez-Santa Cruz, C., Schmidl, C., Sampaio Cordeiro Wagner, A., Puxbaum, H., AQUELLA-Team, 2010. Untersuchung der BaP Quellen in Zederhaus. (Endbericht No. Bericht für das Amt der Salzburger Landesregierung, Institut für Chemische Technologien und Analytik, Technische Universität Wien, Österreich).

Bergamaschi, P., Krol, M., Dentener, F., Vermeulen, A., Meinhardt, F., Graul, R., Ramonet, M., Peters, W., Dlugokencky, E.J., 2005. Inverse modelling of national and European CH4 emissions using the atmospheric zoom model TM5. Atmospheric Chemistry and Physics 5.

Berner, A., Sidla, S., Galambos, Z., Kruisz, C., Hitzenberger, R., ten Brink, H.M., Kos, G.P.A., 1996. Size distributions of soot and other constituents of the atmospheric aerosol. Journal of Geophysical Research 101, 19559–19565.

Berner, A., Galambos, Z., Ctyroky, P., Frühauf, P., Hitzenberger, R., Gomišček, B., Hauck, H., Preining, O., Puxbaum, H., 2004. On the correlation of atmospheric aerosol components of mass size distributions in the larger region of a central European city. Atmospheric Environment 38, 3959–3970. doi:10.1016/j.atmosenv.2004.02.056

BGBl, 1990. 301. Verordnung: Beschränkungen und Verbote der Verwendung, der Herstellung und des Inverkehrsetzens von Vollhalogenierten Fluorchlorkohlenwasserstoffen.

BGBl, 1996. 164. Verordnung des Bundesministers für Umwelt über die Ablagerung von Abfällen (Deponieverordnung).

BGBl, 2002. 447. Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über Verbote und Beschränkungen teilfluorierter und vollfluorierter Kohlenwasserstoffe sowie von Schwefelhexafluorid (HFKW-FKW-SF 6 -V).

BMLFUW (Ed.), 2009. Thermische Abfallbehandlung in Österreich. Weißbuch - Zahlen, Daten, Fakten – 2. Auflage, 2. akt. und erweiterte Auflage. ed. Wien.

Borsós, T., Řimnáčová, D., Ždímal, V., Smolík, J., Wagner, Z., Weidinger, T., Burkart, J., Steiner, G., Reischl, G., Hitzenberger, R., Schwarz, J., Salma, I., 2012. Comparison of particulate number concentrations in three Central European capital cities. Science of The Total Environment 433, 418–426. doi:10.1016/j.scitotenv.2012.06.052

Boulter, I., McCrae, R., Jourmard, R., Keller, M., Hausberger, S., 2007. Final Report on Air Traffic Emissions. Assessment and reliability of transport emission models and inventory systems. (Final Report, DG TREN Contract No. 1999-RD.10429 No. Deliverable No. 15). UK.

Boy, M., Rannik, Ü., Lehtinen, K.E.J., Tarvainen, V., Hakola, H., Kulmala, M., 2003. Nucleation events in the continental boundary layer: Long-term statistical analyses of aerosol relevant characteristics. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 108, n/a–n/a. doi:10.1029/2003JD003838

Brunner, D., Henne, S., Keller, C.A., Reimann, S., Vollmer, M.K., O'Doherty, S., Maione, M., 2012. An extended Kalman-filter for regional scale inverse emission estimation. Atmospheric Chemistry and Physics 12, 3455–3478. doi:10.5194/acp-12-3455-2012

Büchsenmeister, R., 2011. Waldinventur 2007/09: Betriebe und Bundesforste nutzen mehr als den Zuwachs. BFW Praxisinformation 24, 6–9.

Burkart, J., Steiner, G., Reischl, G., Moshammer, H., Neuberger, M., Hitzenberger, R., 2010. Characterizing the performance of two optical particle counters (Grimm OPC1.108 and OPC1.109) under urban aerosol conditions. Journal of Aerosol Science 41, 953–962. doi:10.1016/j.jaerosci.2010.07.007

Burkart, J., Steiner, G., Reischl, G., Hitzenberger, R., 2011. Long-term study of cloud condensation nuclei (CCN) activation of the atmospheric aerosol in Vienna. Atmospheric Environment 45, 5751–5759. doi:10.1016/j.atmosenv.2011.07.022

Burkart, J., Hitzenberger, R., Reischl, G., Bauer, H., Leder, K., Puxbaum, H., 2012. Activation of ‚synthetic ambient' aerosols – Relation to chemical composition of particles <100nm. Atmospheric Environment 54, 583–591. doi:10.1016/j.atmosenv.2012.01.063

Butterbach-Bahl, K., Dannenmann, M., 2011. Denitrification and associated soil N2O emissions due to agricultural activities in a changing climate. Current Opinion in Environmental Sustainability 3, 389–395. doi:10.1016/j.cosust.2011.08.004

Butterbach-Bahl, K., Baggs, E.M., Dannenmann, M., Kiese, R., Zechmeister-Boltenstern, S., 2013. Nitrous oxide emissions from soils: how well do we understand the processes and their controls? Phil. Trans. R. Soc. B 368, 953–962. doi:10.1098/rstb.2013.0122

Carouge, C., Bousquet, P., Peylin, P., Rayner, P.J., Ciais, P., 2010. What can we learn from European continuous atmospheric CO_2 measurements to quantify regional fluxes – Part 1: Potential of the 2001 network. Atmos. Chem. Phys. 10, 3107–3117. doi:10.5194/acp-10-3107-2010

Caseiro, A., Marr, I.L., Claeys, M., Kasper-Giebl, A., Puxbaum, H., Pio, C.A., 2007. Determination of saccharides in atmospheric aerosol using anion-exchange high-performance liquid chromatography and pulsed-amperometric detection. Journal of Chromatography A 1171, 37–45. doi:10.1016/j.chroma.2007.09.038

Caseiro, A., Bauer, H., Schmidl, C., Pio, C.A., Puxbaum, H., 2009. Wood burning impact on PM10 in three Austrian regions. Atmospheric Environment 43, 2186–2195. doi:10.1016/j.atmosenv.2009.01.012

Cavalli, F., Viana, M., Yttri, K.E., Genberg, J., Putaud, J.-P., 2010. Toward a standardised thermal-optical protocol for measuring atmospheric organic and elemental carbon: the EUSAAR protocol. Atmospheric Measurement Techniques 3, 79–89. doi:10.5194/amt-3-79-2010

Chen, G.Q., Zhang, B., 2010. Greenhouse gas emissions in China 2007: Inventory and input-output analysis. Energy Policy 38, 6180–6193. doi:10.1016/j.enpol.2010.06.004

Ciais, P., Rayner, P., Chevallier, F., Bousquet, P., Logan, M., Peylin, P., Ramonet, M., 2010. Atmospheric inversions for estimating CO_2 fluxes: methods and perspectives. Climatic Change 103, 69–92. doi:10.1007/s10584-010-9909-3

Corazza, M., Bergamaschi, P., Vermeulen, A.T., Aalto, T., Haszpra, L., Meinhardt, F., O'Doherty, S., Thompson, R., Moncrieff, J., Popa, E., Steinbacher, M., Jordan, A., Dlugokencky, E., Brühl, C., Krol, M., Dentener, F., 2011. Inverse modelling of European N2O emissions: assimilating observations from different networks. Atmos. Chem. Phys. 11, 2381–2398. doi:10.5194/acp-11-2381-2011

Dall'Amico, M., Gray, L.J., Rosenlof, K.H., Scaife, A.A., Shine, K.P., Stott, P.A., 2010. Stratospheric temperature trends: impact of ozone variability and the QBO. Clim Dyn 34, 381–398. doi:10.1007/s00382-009-0604-x

Dameris, M., Peter, T., Schmidt, U., Zellner, R., 2007. Das Ozonloch und seine Ursachen. Chemie in unserer Zeit 41, 152–168. doi:10.1002/ciuz.200700418

De Gouw, J., Jimenez, J.L., 2009. Organic Aerosols in the Earth's Atmosphere. Environ. Sci. Technol. 43, 7614–7618. doi:10.1021/es9006004

De Gouw, J.A., Middlebrook, A.M., Warneke, C., Goldan, P.D., Kuster, W.C., Roberts, J.M., Fehsenfeld, F.C., Worsnop, D.R., Canagaratna, M.R., Pszenny, A. A. P., Keene, W.C., Marchewka, M., Bertman, S.B., Bates, T.S., 2005. Budget of organic carbon in a polluted atmosphere: Results from the New England Air Quality Study in 2002. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 110, n/a–n/a. doi:10.1029/2004JD005623

Dusek, U., Frank, G.P., Hildebrandt, L., Curtius, J., Schneider, J., Walter, S., Chand, D., Drewnick, F., Hings, S., Jung, D., Borrmann, S., Andreae, M.O., 2006. Size Matters More Than Chemistry for Cloud-Nucleating Ability of Aerosol Particles. Science 312, 1375–1378. doi:10.1126/science.1125261

Effenberger, C., Kranabetter, A., Kaiser, A., Kasper-Giebl, A., 2008. Aerosolmessungen am Sonnblick Observatorium – Probenahme und Analyse der PM10 Fraktion. (Endbericht zum Auftrag GZ 7.500/0002-VI/4/2006). Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur, Technische Universität Wien, Österreich.

Europäisches Parlament, 2006. Richtlinie 2006/40/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Emissionen aus Klimaanlagen in Kraftfahrzeugen und zur Änderung der Richtlinie 70/156/EWG des Rates (Text mit Bedeutung für den EWR).

Eyring, V., Butchart, N., Waugh, D.W., Akiyoshi, H., Austin, J., Bekki, S., Bodeker, G.E., Boville, B.A., Brühl, C., Chipperfield, M.P., Cordero, E., Dameris, M., Deushi, M., Fioletov, V.E., Frith, S.M., Garcia, R.R., Gettelman, A., Giorgetta, M.A., Grewe, V., Jourdain, L., Kinnison, D.E., Mancini, E., Manzini, E., Marchand, M., Marsh, D.R., Nagashima, T., Newman, P.A., Nielsen, J.E., Pawson, S., Pitari, G., Plummer, D.A., Rozanov, E., Schraner, M., Shepherd, T.G., Shibata, K., Stolarski, R.S., Struthers, H., Tian, W., Yoshiki, M., 2006. Assessment of temperature, trace species, and ozone in chemistry-climate model simulations of the recent past. Journal of Geophysical Research 111. doi:10.1029/2006JD007327

Feczko, T., Puxbaum, H., Kasper-Giebl, A., Handler, M., Limbeck, A., Gelencsér, A., Pio, C., Preunkert, S., Legrand, M., 2007. Determination of water and alkaline extractable atmospheric humic-like substances with the TU Vienna HULIS analyzer in samples from six background sites in Europe. Journal of Geophysical Research 112. doi:10.1029/2006JD008331

Fellner, J., Cencic, O., Rechberger, H., 2007. A New Method to Determine the Ratio of Electricity Production from Fossil and Biogenic Sources in Waste-to-Energy Plants. Environmental Science & Technology 41, 2579–2586. doi:10.1021/es0617587

Graus, M., Müller, M., Hansel, A., 2010. High resolution PTR-TOF: Quantification and formula confirmation of VOC in real time. Journal of the American Society for Mass Spectrometry 21, 1037–1044. doi:10.1016/j.jasms.2010.02.006

Gschwantner, T., Schadauer, K., 2006. Branch biomass functions for broadleaved tree species in Austria. Austrian Journal of Forest Science 123, 17–34.

Hackl, A., Mauschitz, G., 1996. Methangas und Kohlendioxid aus der Bereitstellung in Österreich genützter fossiler Energieträger. (Jahresbericht der CO_2-Kommission 1996 im Auftrag des Bundes-

ministeriums für Umwelt, Jugend und Familie und Akademie für Umwelt und Energie, Laxenburg, Österreich). Laxenburg / Wien.

Hackl, A., Mauschitz, G., 1997. Klimarelevanz der Abfallwirtschaft (Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Jugend und Familie, Sektion III). Weitra / Wien.

Hackl, A., Mauschitz, G., 1999. Beiträge zum Klimaschutz durch nachhaltige Restmüllbehandlung (Klimarelevanz der Abfallwirtschaft II) (Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Jugend und Familie, Sektion III). Weitra / Wien.

Hackl, E., Zechmeister-Boltenstern, S., Kandeler, E., 2000. Nitrogen dynamics in different types of pasture in the Austrian Alps. Biol Fertil Soils 32, 321–327. doi:10.1007/s003740000255

Hackl, E., Bachmann, G., Zechmeister-Boltenstern, S., 2004. Microbial nitrogen turnover in soils under different types of natural forest. Forest Ecology and Management 188, 101–112. doi:10.1016/j.foreco.2003.07.014

Hallquist, M., Wenger, J.C., Baltensperger, U., Rudich, Y., Simpson, D., Claeys, M., Dommen, J., Donahue, N.M., George, C., Goldstein, A.H., Hamilton, J.F., Herrmann, H., Hoffmann, T., Iinuma, Y., Jang, M., Jenkin, M.E., Jimenez, J.L., Kiendler-Scharr, A., Maenhaut, W., McFiggans, G., Mentel, T.F., Monod, A., Prévôt, A.S.H., Seinfeld, J.H., Surratt, J.D., Szmigielski, R., Wildt, J., 2009. The formation, properties and impact of secondary organic aerosol: current and emerging issues. Atmos. Chem. Phys. 9, 5155–5236. doi:10.5194/acp-9-5155-2009

Hauck, H., Berner, A., Frischer, T., Gomiscek, B., Kundi, M., Neuberger, M., Puxbaum, H., Preining, O., 2004. AUPHEP—Austrian Project on Health Effects of Particulates—general overview. Atmospheric Environment 38, 3905–3915. doi:10.1016/j.atmosenv.2003.09.080

Hausberger, S., Schwingshackl, M., 2011. Update der Emissionsprognose Verkehr Österreich bis 2030 (Studie erstellt im Auftrag des Klima- und Energiefonds No. Inst-03/11/ Haus Em 09/10-679). TU Graz, Graz.

Heald, C.L., Jacob, D.J., Park, R.J., Russell, L.M., Huebert, B.J., Seinfeld, J.H., Liao, H., Weber, R.J., 2005. A large organic aerosol source in the free troposphere missing from current models. Geophysical Research Letters 32, n/a–n/a. doi:10.1029/2005GL023831

Henrich, M., Haselwandter, K., 1997. Denitrification and gaseous nitrogen losses from an acid spruce forest soil. Soil Biology and Biochemistry 29, 1529–1537. doi:10.1016/S0038-0717(97)00010-2

Hirtl, M., Krüger, B.C., Petz, E., Flandorfer, C., 2011. Assimilation of Ground Based Ozone Measurements to Improve the Air Quality Forecasts For Austria, in: Geophysical Research Abstracts Vol. 13, EGU2011-5477, 2011 EGU General Assembly 2011. Presented at the EGU, Wien.

Hitzenberger, R.M., 1993. Absorption coefficients and mass concentrations of the urban aerosol of Vienna, Austria, during the years 1985 and 1986. Water, Air, & Soil Pollution 71, 131–153. doi:10.1007/BF00475516

Hitzenberger, R., Tursic, J., 2009. Particulate Matter - Properties related to Health Effects. Final Report COST633. COST, Brussels.

Hitzenberger, R., Fohler-Norek, C., Dusek, U., Galambos, Z., Sidla, S., 1996. Comparison of recent (1994) black carbon data with those obtained in 1985 and 1986 in the urban area of Vienna, Austria: implications for future environmental policy decisions. Science of The Total Environment 189-190, 275–280. doi:10.1016/0048-9697(96)05219-9

Hitzenberger, R., Berner, A., Giebl, H., Kromp, R., Larson, S.M., Rouc, A., Koch, A., Marischka, S., Puxbaum, H., 1999. Contribution of carbonaceous material to cloud condensation nuclei concentrations in European background (Mt. Sonnblick) and urban (Vienna) aerosols. Atmospheric Environment 33, 2647–2659. doi:10.1016/S1352-2310(98)00391-4

Hitzenberger, R., Berner, A., Kromp, R., Kasper-Giebl, A., Limbeck, A., Tscherwenka, W., Puxbaum, H., 2000a. Black carbon and other species at a high-elevation European site (Mount Sonnblick, 3106 m, Austria): Concentrations and scavenging efficiencies. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 105, 24637–24645. doi:10.1029/2000JD900349

Hitzenberger, R., Giebl, H., Berner, A., Kromp, R., Reischl, G., Kasper-Giebl, A., Puxbaum, H., 2000b. Measurements of CCN-concentrations in the European alpine aerosol using a newly developed static thermal diffusion counter. AIP Conference Proceedings 534, 861–864. doi:10.1063/1.1361995

Hitzenberger, R., Berner, A., Giebl, H., Drobesch, K., Kasper-Giebl, A., Loeflund, M., Urban, H., Puxbaum, H., 2001. Black carbon (BC) in alpine aerosols and cloud water—concentrations and scavenging efficiencies. Atmospheric Environment 35, 5135–5141. doi:10.1016/S1352-2310(01)00312-0

Hitzenberger, R., Ctyroky, P., Berner, A., Turšič, J., Podkrajšek, B., Grgić, I., 2006a. Size distribution of black (BC) and total carbon (TC) in Vienna and Ljubljana. Chemosphere 65, 2106–2113. doi:10.1016/j.chemosphere.2006.06.042

Hitzenberger, R., Petzold, A., Bauer, H., Ctyroky, P., Pouresmaeil, P., Laskus, L., Puxbaum, H., 2006b. Intercomparison of Thermal and Optical Measurement Methods for Elemental Carbon and Black Carbon at an Urban Location. Environ. Sci. Technol. 40, 6377–6383. doi:10.1021/es051228v

Hudson, J.G., 2007. Variability of the relationship between particle size and cloud-nucleating ability. Geophysical Research Letters 34. doi:10.1029/2006GL028850

Iorga, G., Hitzenberger, R., Kasper-Giebl, A., Puxbaum, H., 2007. Direct radiative effect modeled for regional aerosols in central Europe including the effect of relative humidity. Journal of Geophysical Research 112. doi:10.1029/2005JD006828

IPCC, 1997. Greenhouse Gas Inventory - IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. IPCC/OECD/IEA, Bracknell, UK.

IPCC, 2001. Radiative Forcing of Climate Change., in: Ramaswamy, V., Boucher, O., Haigh, J., Hauglustaine, D., Haywood, J., Myhre, G., Nakajima, T., Shi, G.Y., Solomon, S., Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C.A. (Eds.), Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC, 2006. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Japan.

IPCC, 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Jacobson, M.Z., 2010. Short-term effects of controlling fossil-fuel soot, biofuel soot and gases, and methane on climate, Arctic ice, and air pollution health. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 115. doi:10.1029/2009JD013795

Jankowski, N., Schmidl, C., Marr, I.L., Bauer, H., Puxbaum, H., 2008. Comparison of methods for the quantification of carbonate

carbon in atmospheric PM10 aerosol samples. Atmospheric Environment 42, 8055–8064. doi:10.1016/j.atmosenv.2008.06.012

Jonas, M., Marland, G., Winiwarter, W., White, T., Nahorski, Z., Bun, R., Nilsson, S., 2010. Benefits of dealing with uncertainty in greenhouse gas inventories: introduction. Climatic Change 103, 3–18. doi:10.1007/s10584-010-9922-6

Jurányi, Z., Gysel, M., Weingartner, E., Bukowiecki, N., Kammermann, L., Baltensperger, U., 2011. A 17 month climatology of the cloud condensation nuclei number concentration at the high alpine site Jungfraujoch. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 116, n/a–n/a. doi:10.1029/2010JD015199

Kanakidou, M., Seinfeld, J.H., Pandis, S.N., Barnes, I., Dentener, F.J., Facchini, M.C., Van Dingenen, R., Ervens, B., Nenes, A., Nielsen, C.J., Swietlicki, E., Putaud, J.P., Balkanski, Y., Fuzzi, S., Horth, J., Moortgat, G.K., Winterhalter, R., Myhre, C.E.L., Tsigaridis, K., Vignati, E., Stephanou, E.G., Wilson, J., 2005. Organic aerosol and global climate modelling: a review. Atmos. Chem. Phys. 5, 1053–1123. doi:10.5194/acp-5-1053-2005

Kasper, A., Puxbaum, H., 1998. Seasonal variation of SO2, HNO3, NH3 and selected aerosol components at Sonnblick (3106 m a.s.l.). Atmospheric Environment 32, 3925–3939. doi:10.1016/S1352-2310(97)00031-9

Kasper-Giebl, A., Koch, A., Hitzenberger, R., Puxbaum, H., 2000. Scavenging Efficiency of ‚Aerosol Carbon' and Sulfate in Supercooled Clouds at Mt. Sonnblick (3106 m a.s.l., Austria). Journal of Atmospheric Chemistry 35, 33–46. doi:10.1023/A:1006250508562

Kelz, J., Brunner, T., Obernberger, I., 2012. Emission factors and chemical characterisation of fine particulate emissions from modern and old residential biomass heating systems determined for typical load cycles. Environmental Sciences Europe 24. doi:10.1186/2190-4715-24-11

Kirkby, J., Curtius, J., Almeida, J., Dunne, E., Duplissy, J., Ehrhart, S., Franchin, A., Gagné, S., Ickes, L., Kürten, A., Kupc, A., Metzger, A., Riccobono, F., Rondo, L., Schobesberger, S., Tsagkogeorgas, G., Wimmer, D., Amorim, A., Bianchi, F., Breitenlechner, M., David, A., Dommen, J., Downard, A., Ehn, M., Flagan, R.C., Haider, S., Hansel, A., Hauser, D., Jud, W., Junninen, H., Kreissl, F., Kvashin, A., Laaksonen, A., Lehtipalo, K., Lima, J., Lovejoy, E.R., Makhmutov, V., Mathot, S., Mikkilä, J., Minginette, P., Mogo, S., Nieminen, T., Onnela, A., Pereira, P., Petäjä, T., Schnitzhofer, R., Seinfeld, J.H., Sipilä, M., Stozhkov, Y., Stratmann, F., Tomé, A., Vanhanen, J., Viisanen, Y., Vrtala, A., Wagner, P.E., Walther, H., Weingartner, E., Wex, H., Winkler, P.M., Carslaw, K.S., Worsnop, D.R., Baltensperger, U., Kulmala, M., 2011. Role of sulphuric acid, ammonia and galactic cosmic rays in atmospheric aerosol nucleation. Nature 476, 429–433. doi:10.1038/nature10343

Kitzler, B., Zechmeister-Boltenstein, S., Holtermann, C., Skiba, U., Butterbach-Bahl, K., 2006. Nitrogen oxides emission from two beech forests subjected to different nitrogen loads. Biogeosciences 3, 293–310. doi:10.5194/bg-3-293-2006

Knörr, W., Hausberger, S., Helms, H., Lambrecht, U., Keller, M., Steven, H., 2011. Weiterentwicklung der Emissionsfaktoren für das HAndbuch der Emissionsfaktoren (HBEFA). (Endbericht Ausarbeitung im Auftrag des Umweltbundesamtes). Umweltbundesamt, Deutschland, Heidelberg, Germany.

Kotianova, P., Puxbaum, H., Bauer, H., Caseiro, A., Marr, I., Cik, G., 2008. Temporal patterns of n-alkanes at traffic exposed and suburban sites in Vienna. Atmospheric Environment 42, 2993–3005. doi:10.1016/j.atmosenv.2007.12.048

Krol, M., Houweling, S., Bregman, B., van den Broek, M., Segers, A., van Velthoven, P., Peters, W., Dentener, F., Bergamaschi, P., 2005. The two-way nested global chemistry-transport zoom model TM5: algorithm and applications. Atmos. Chem. Phys. 5, 417–432. doi:10.5194/acp-5-417-2005

Kunit, M., Puxbaum, H., 1996. Enzymatic determination of the cellulose content of atmospheric aerosols. Atmospheric Environment 30, 1233–1236. doi:10.1016/1352-2310(95)00429-7

Leder, K., 2008. Trend und Jahresverlauf der Niederschlagsdaten in Österreich von 1983 bis 2007. Diplomarbeit an der Technischen Universität Wien (Diplomarbeit). TU Wien, Fakultät für Technische Chemie | Institut für Chemische Technologien und Analytik | E164, Wien.

Ledermann, T., Gschwantner, T., 2006. A comparison of selected Austrian biomass equations. Central 123, 467–183.

Ledermann, T., Neumann, M., 2006. Biomass equations from data of old long-term experimental plots. Central 123, 47–64.

Limbeck, A., Rendl, J., Heimburger, G., Kranabetter, A., Puxbaum, H., 2004. Seasonal variation of palladium, elemental carbon and aerosol mass concentrations in airborne particulate matter. Atmospheric Environment 38, 1979–1987. doi:10.1016/j.atmosenv.2003.12.029

Limbeck, A., Handler, M., Neuberger, B., Klatzer, B., Puxbaum, H., 2005. Carbon-Specific Analysis of Humic-like Substances in Atmospheric Aerosol and Precipitation Samples. Analytical Chemistry 77, 7288–7293. doi:10.1021/ac050953l

Limbeck, A., Handler, M., Puls, C., Zbiral, J., Bauer, H., Puxbaum, H., 2009. Impact of mineral components and selected trace metals on ambient PM10 concentrations. Atmospheric Environment 43, 530–538. doi:10.1016/j.atmosenv.2008.10.012

Loibl, W., Winiwarter, W., Kopsca, A., Züger, J., Baumann, R., 1994. Estimating the spatial distribution of ozone concentrations in complex terrain. Atmospheric Environment 28, 2557–2566. doi:10.1016/1352-2310(94)90430-8

Luz, R., Zallinger, M., Hausberger, S., Hirschmann, K., Fellendorf, M., 2010. Das Modell PHEM zur Erstellung der Basis-Emissionsfaktoren im neuen HBEFA 3.1, in: Proceedings Des 3. Freiburger Workshops Luftreinhaltung Und Modelle. Presented at the Workshops Luftreinhaltung und Modelle, Freiburg, Germany.

Manney, G.L., Santee, M.L., Rex, M., Livesey, N.J., Pitts, M.C., Veefkind, P., Nash, E.R., Wohltmann, I., Lehmann, R., Froidevaux, L., Poole, L.R., Schoeberl, M.R., Haffner, D.P., Davies, J., Dorokhov, V., Gernandt, H., Johnson, B., Kivi, R., Kyrö, E., Larsen, N., Levelt, P.F., Makshtas, A., McElroy, C.T., Nakajima, H., Parrondo, M.C., Tarasick, D.W., von der Gathen, P., Walker, K.A., Zinoviev, N.S., 2011. Unprecedented Arctic ozone loss in 2011 echoed in the Antarctic ozone hole. Nature 478, 469–475. doi:10.1038/nature10556

Mauschitz, G., 2009. Klimarelevanz der Abfallwirtschaft IV. (Bericht im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft). Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften, Abteilung: Mechanische Verfahrenstechnik und Luftreinhaltetechnik, Technische Universität Wien, Österreich.

McFiggans, G., Artaxo, P., Baltensperger, U., Coe, H., Facchini, M.C., Feingold, G., Fuzzi, S., Gysel, M., Laaksonen, A., Lohmann, U., Mentel, T.F., Murphy, D.M., O'Dowd, C.D., Snider, J.R., Weingartner, E., 2006. The effect of physical and chemical aerosol properties on warm cloud droplet activation. Atmos. Chem. Phys. 6, 2593–2649. doi:10.5194/acp-6-2593-2006

Metzger, A., Verheggen, B., Dommen, J., Duplissy, J., Prevot, A.S.H., Weingartner, E., Riipinen, I., Kulmala, M., Spracklen, D.V., Carslaw, K.S., Baltensperger, U., 2010. Evidence for the role of organics in aerosol particle formation under atmospheric conditions. PNAS 107, 6646–6651. doi:10.1073/pnas.0911330107

Molitor, R., Hausberger, S., Benke, G., Lichtblau, G., Reitschuler, G., Stix, G., 2009. Abschätzung der Auswirkungen des Kraftstoffexports im Tank auf den Kraftstoffabsatz und die Entwicklung der CO_2- und Luftschadstoffemissionen in Österreich – Aktualisierung 2007 und Prognose 2030 (Bericht. Durchgeführt im Auftrag des Bundesmin isteriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie). Wien - Graz.

Müller, M., Graus, M., Ruuskanen, T.M., Schnitzhofer, R., Bamberger, I., Kaser, L., Titzmann, T., Hörtnagl, L., Wohlfahrt, G., Karl, T., Hansel, A., 2010. First eddy covariance flux measurements by PTR-TOF. Atmospheric Measurement Techniques 3, 387–395. doi:10.5194/amt-3-387-2010

Murphy, D.M., Cziczo, D.J., Froyd, K.D., Hudson, P.K., Matthew, B.M., Middlebrook, A.M., Peltier, R.E., Sullivan, A., Thomson, D.S., Weber, R.J., 2006. Single-particle mass spectrometry of tropospheric aerosol particles. Journal of Geophysical Research 111. doi:10.1029/2006JD007340

Neubauer, D., 2009. Modellierung des indirekten Strahlungseffekts des Hintergrundaerosols in Österreich (phd). uniwien, wien.

Norman, M., Hansel, A., Wisthaler, A., 2007. O_2+ as reagent ion in the PTR-MS instrument: Detection of gas-phase ammonia. International Journal of Mass Spectrometry 265, 382–387. doi:10.1016/j.ijms.2007.06.010

Obermoser, M., Fellner, J., Rechberger, H., 2009. Determination of reliable CO_2 emission factors for waste-to-energy plants. Waste Management & Research 27, 907–913. doi:10.1177/0734242X09349763

Offenthaler, I., Hochbichler, E., 2006. Estimation of root biomass of Austrian forest tree species. Centralblatt für das gesamte Forstwesen 65–86.

Palmetshofer, J., 2012. Größenverteilungen des atmosphärischen Aerosols in Wien (dipl). Universität Wien, Wien.

Peng, G., Puxbaum, H., Bauer, H., Jankowski, N., Shi, Y., 2010. Improved source assessment of Si, Al and related mineral components to PM10 based on a daily sampling procedure. J Environ Sci (China) 22, 582–588.

Pilegaard, K., Skiba, U., Ambus, P., Beier, C., Brüggemann, N., Butterbach-Bahl, K., Dick, J., Dorsey, J., Duyzer, J., Gallagher, M., Gasche, R., Horvath, L., Kitzler, B., Leip, A., Pihlatie, M.K., Rosenkranz, P., Seufert, G., Vesala, T., Westrate, H., Zechmeister-Boltenstern, S., 2006. Factors controlling regional differences in forest soil emission of nitrogen oxides (NO and N_2O). Biogeosciences 3, 651–661.

Pio, C.A., Legrand, M., Alves, C.A., Oliveira, T., Afonso, J., Caseiro, A., Puxbaum, H., Sanchez-Ochoa, A., Gelencsér, A., 2008. Chemical composition of atmospheric aerosols during the 2003 summer intense forest fire period. Atmospheric Environment 42, 7530–7543. doi:10.1016/j.atmosenv.2008.05.032

Pörtl, K., Zechmeister-Boltenstern, S., Wanek, W., Ambus, P., Berger, T.W., 2007. Natural 15N abundance of soil N pools and N_2O reflect the nitrogen dynamics of forest soils. Plant Soil 295, 79–94. doi:10.1007/s11104-007-9264-y

Putaud, J.-P., Van Dingenen, R., Alastuey, A., Bauer, H., Birmili, W., Cyrys, J., Flentje, H., Fuzzi, S., Gehrig, R., Hansson, H.C., Harrison, R.M., Herrmann, H., Hitzenberger, R., Hüglin, C., Jones, A.M., Kasper-Giebl, A., Kiss, G., Kousa, A., Kuhlbusch, T.A.J., Löschau, G., Maenhaut, W., Molnar, A., Moreno, T., Pekkanen, J., Perrino, C., Pitz, M., Puxbaum, H., Querol, X., Rodriguez, S., Salma, I., Schwarz, J., Smolik, J., Schneider, J., Spindler, G., ten Brink, H., Tursic, J., Viana, M., Wiedensohler, A., Raes, F., 2010. A European aerosol phenomenology – 3: Physical and chemical characteristics of particulate matter from 60 rural, urban, and kerbside sites across Europe. Atmospheric Environment 44, 1308–1320. doi:10.1016/j.atmosenv.2009.12.011

Puxbaum, H., Gomiscek, B., Kalina, M., Bauer, H., Salam, A., Stopper, S., Preining, O., Hauck, H., 2004. A dual site study of PM2.5 and PM10 aerosol chemistry in the larger region of Vienna, Austria. Atmospheric Environment 38, 3949–3958. doi:10.1016/j.atmosenv.2003.12.043

Puxbaum, H., Caseiro, A., Sánchez-Ochoa, A., Kasper-Giebl, A., Claeys, M., Gelencsér, A., Legrand, M., Preunkert, S., Pio, C., 2007. Levoglucosan levels at background sites in Europe for assessing the impact of biomass combustion on the European aerosol background. Journal of Geophysical Research 112. doi:10.1029/2006JD008114

Ravishankara, A.R., Daniel, J.S., Portmann, R.W., 2009. Nitrous Oxide (N2O): The Dominant Ozone-Depleting Substance Emitted in the 21st Century. Science 326, 123–125. doi:10.1126/science.1176985

Reddington, C.L., Carslaw, K.S., Spracklen, D.V., Frontoso, M.G., Collins, L., Merikanto, J., Minikin, A., Hamburger, T., Coe, H., Kulmala, M., Aalto, P., Flentje, H., Plass-Dülmer, C., Birmili, W., Wiedensohler, A., Wehner, B., Tuch, T., Sonntag, A., O'Dowd, C.D., Jennings, S.G., Dupuy, R., Baltensperger, U., Weingartner, E., Hansson, H.-C., Tunved, P., Laj, P., Sellegri, K., Boulon, J., Putaud, J.-P., Gruening, C., Swietlicki, E., Roldin, P., Henzing, J.S., Moerman, M., Mihalopoulos, N., Kouvarakis, G., Ždímal, V., Zíková, N., Marinoni, A., Bonasoni, P., Duchi, R., 2011. Primary versus secondary contributions to particle number concentrations in the European boundary layer. Atmospheric Chemistry and Physics 11, 12007–12036. doi:10.5194/acp-11-12007-2011

Reisinger, P., Wonaschütz, A., Hitzenberger, R., Petzold, A., Bauer, H., Jankowski, N., Puxbaum, H., Chi, X., Maenhaut, W., 2008. Intercomparison of Measurement Techniques for Black or Elemental Carbon Under Urban Background Conditions in Wintertime: Influence of Biomass Combustion. Environmental Science & Technology 42, 884–889. doi:10.1021/es0715041

Richtlinie 2004/8/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über die Förderung einer am Nutzwärmebedarf orientierten Kraft-Wärme-Kopplung im Energiebinnenmarkt und zur Änderung der Richtlinie 92/42/EWG, 2004. , L 52/50.

Richtlinie 2006/40/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über Emissionen aus Klimaanlagen in Kraftfahrzeugen und zur Änderung der Richtlinie 70/156/EWG des Rates (Text mit Bedeutung für den EWR), 2006. , L 161/12.

Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG, 2009. , L 140/16.

Russ, W., 2011. Mehr Wald in Österreich. BFW Praxisinformation 24, 3–5.

Ruuskanen, T.M., Müller, M., Schnitzhofer, R., Karl, T., Graus, M., Bamberger, I., Hörtnagl, L., Brilli, F., Wohlfahrt, G., Hansel, A., 2011. Eddy covariance VOC emission and deposition fluxes above grassland using PTR-TOF. Atmospheric Chemistry and Physics 11, 611–625. doi:10.5194/acp-11-611-2011

Sanchez-Ochoa, A., Kasper-Giebl, A., 2005. Backgroundmessungen Sonnblick. Erfassung von Gase, Aerosol und nasser Deposition an der Hintergrundmessstelle Sonnblick. (Endbericht im Auftrag GZ 30.995/2-VI/A/5/02 des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft und Kultur). Technische Universität Wien, Österreich.

Sánchez-Ochoa, A., Kasper-Giebl, A., Puxbaum, H., Gelencser, A., Legrand, M., Pio, C., 2007. Concentration of atmospheric cellulose: A proxy for plant debris across a west-east transect over Europe. Journal of Geophysical Research 112. doi:10.1029/2006JD008180

Schmid, H., Laskus, L., Jürgen Abraham, H., Baltensperger, U., Lavanchy, V., Bizjak, M., Burba, P., Cachier, H., Crow, D., Chow, J., Gnauk, T., Even, A., ten Brink, H.., Giesen, K.-P., Hitzenberger, R., Hueglin, C., Maenhaut, W., Pio, C., Carvalho, A., Putaud, J.-P., Toom-Sauntry, D., Puxbaum, H., 2001. Results of the ‚carbon conference' international aerosol carbon round robin test stage I. Atmospheric Environment 35, 2111–2121. doi:10.1016/S1352-2310(00)00493-3

Schmidl, C., Bauer, H., Dattler, A., Hitzenberger, R., Weissenboeck, G., Marr, I.L., Puxbaum, H., 2008a. Chemical characterisation of particle emissions from burning leaves. Atmospheric Environment 42, 9070–9079. doi:10.1016/j.atmosenv.2008.09.010

Schmidl, C., Marr, I.L., Caseiro, A., Kotianová, P., Berner, A., Bauer, H., Kasper-Giebl, A., Puxbaum, H., 2008b. Chemical characterisation of fine particle emissions from wood stove combustion of common woods growing in mid-European Alpine regions. Atmospheric Environment 42, 126–141. doi:10.1016/j.atmosenv.2007.09.028

Schmidl, C., Luisser, M., Padouvas, E., Lasselsberger, L., Rzaca, M., Ramirez-Santa Cruz, C., Handler, M., Peng, G., Bauer, H., Puxbaum, H., 2011. Particulate and gaseous emissions from manually and automatically fired small scale combustion systems. Atmospheric Environment 45, 7443–7454. doi:10.1016/j.atmosenv.2011.05.006

Schwingshackl, M., Hausberger, S., 2011. Straßenverkehrsemissionen und Emissionen sonstiger mobiler Quellen Österreichs für die Jahre 1990 bis 2010. (Forschungsbericht No. FVT-80/11/Haus Em 20/11-6790). Im Auftrag des Umweltbundesamts, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, Technische Universität Graz, Graz, Österreich.

Seibert, P., 2010. TTORCH – A New ESF Research Network for Non-CO_2 Greenhouse Gases. Klimafosrschungsinitiative AustroClim. 11. Österreichischer Klimatag: Forschung zu ‚Klima im Wandel, Auswirkungen und Strategien' in Österreich.

Shine, K.P., Bourqui, M.S., Forster, P.M. de F., Hare, S.H.E., Langematz, U., Braesicke, P., Grewe, V., Ponater, M., Schnadt, C., Smith, C.A., Haigh, J.D., Austin, J., Butchart, N., Shindell, D.T., Randel, W.J., Nagashima, T., Portmann, R.W., Solomon, S., Seidel, D.J., Lanzante, J., Klein, S., Ramaswamy, V., Schwarzkopf, M.D., 2003. A comparison of model-simulated trends in stratospheric temperatures. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 129, 1565–1588. doi:10.1256/qj.02.186

Simic, S., Schmalwieser, A.W., Moshammer, H., 2009. BOKU-Met Report 15 Gesundheitsrisiken für die österreichische Bevölkerung durch die Abnahme des stratosphärischen Ozons (Endbericht zum Projekt StartClim2007.B. Auftraggeber: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft; Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung; Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit; Österreichische Hagelversicherung; Verbund AHP; Bundesministerium für Gesundheit, Familie und Jugend No. BOKU-Met Report 15). Institut für Meteorologie (BOKU-Met) Department Wasser – Atmosphäre – Umwelt. Universität für Bodenkultur Wien, Wien.

Simpson, D., Benedictow, A., Berge, H., Bergström, R., Emberson, L.D., Fagerli, H., Flechard, C.R., Hayman, G.D., Gauss, M., Jonson, J.E., Jenkin, M.E., Nyíri, A., Richter, C., Semeena, V.S., Tsyro, S., Tuovinen, J.-P., Valdebenito, Á., Wind, P., 2012. The EMEP MSC-W chemical transport model – technical description. Atmospheric Chemistry and Physics 12, 7825-7865. doi:10.5194/acp-12-7825-2012

Statistik Austria, Energiebilanzen. [WWW Document]. Statistik Austria. URL http://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_und_umwelt/energie/energiebilanzen/index.html.

Steinbrecht, W., Claude, H., Köhler, U., Galleithner, B., 2011. Wirkt ein arktisches ‚Ozonloch' bis in unsere Breiten? (No. 129), Ozonbulletin des DWD. Meteorologisches Observatorium Hohenpeißenberg, Hohenpeißenberg, Deutschland.

Stohl, A., Seibert, P., Arduini, J., Eckhardt, S., Fraser, P., Greally, B.R., Lunder, C., Maione, M., Mühle, J., O'Doherty, S., Prinn, R.G., Reimann, S., Saito, T., Schmidbauer, N., Simmonds, P.G., Vollmer, M.K., Weiss, R.F., Yokouchi, Y., 2009. An analytical inversion method for determining regional and global emissions of greenhouse gases: Sensitivity studies and application to halocarbons. Atmos. Chem. Phys. 9, 1597–1620. doi:10.5194/acp-9-1597-2009

Tolk, L.F., Dolman, A.J., Meesters, A.G.C.A., Peters, W., 2011. A comparison of different inverse carbon flux estimation approaches for application on a regional domain. Atmos. Chem. Phys. 11, 10349–10365. doi:10.5194/acp-11-10349-2011

Tuomi, M., Thum, T., Järvinen, H., Fronzek, S., Berg, B., Harmon, M., Trofymow, J.A., Sevanto, S., Liski, J., 2009. Leaf litter decomposition—Estimates of global variability based on Yasso07 model. Ecological Modelling 220, 3362–3371. doi:10.1016/j.ecolmodel.2009.05.016

Umweltbundesamt, Weiss, P., Schieler, K., Schadauer, K., Radunsky, K., Englisch, M., 2000. Die Kohlenstoffbilanz des österreichischen Waldes und Betrachtungen zum Kyoto-Protokoll, Monographien M106. Umweltbundesamt, Wien, Österreich.

Umweltbundesamt, Pazdernik, K., Anderl, M., Freudenschuß, A., Friedrich, A., Köther, T., Kriech, M., Kuschel, V., Muik, B., Poupa, S., Schodl, B., Stranner, G., Schwaiger, E., Seuss, K., Weiss, P., Wieser, M., Zethner, G., 2010. Austria's National Inventory Report 2010. Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and under the Kyoto Protocol. (No. R-0265). Umweltbundesamt, Wien, Österreich.

Umweltbundesamt, Krutzler, T., Böhmer, S., Gössl, M., Lichtblau, G., Schindler, I., Storch, A., Stranner, G., Wiesenberger, H., Zechmeister, A., 2011a. Energiewirtschaftliche Inputdaten und Szenarien als Grundlage für die Klimastrategie 2020 und den Monitoring Mechnism 2011: Synthesebericht 2011 (No. R-0333). Umweltbundsamt, Wien, Österreich.

Umweltbundesamt, Anderl, M., Gangl, M., Ibesich, N., Pazdernik, K., Poupa, S., Purzner, M., Zechmeister, A., 2011b. Bundesländer Luftschadstoff-Inventur 1990-2009.Regionalisierung der nationalen Emissionsdaten auf Grundlage von EU-Berichtspflichten (No. R-352). Umweltbundesamt, Wien, Österreich.

Umweltbundesamt, Pazdernik, K., Anderl, M., Freudenschuß, A., Haider, S., Köther, T., Lampert, C., Poupa, S., Purzner, M., 2012a. Austria´s Annual Greenhouse Gas Inventory 1990-2010.

Submission under Decision 280/2004/EC (No. R-0361). Umweltbundesamt, Wien, Österreich.

Umweltbundesamt, Köther, T., Anderl, M., Haider, S., Jobstmann, H., Pazdernik, K., Perl, D., Poupa, S., Purzner, M., Schodl, B., Sporer, M., Stranner, G., Wieser, M., Zechmeister, A., 2012b. Austria´s Informative Inventory Report (IIR) 2012. Submission under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution. (No. R-0380). Umweltbundesamt, Wien, Österreich.

Umweltbundesamt, Pazdernik, K., Anderl, M., Freudenschuß, A., Friedrich, A., Haider, S., Jobstmann, H., Köther, T., Kriech, M., Kuschel, V., Lampert, C., Poupa, S., Purzner, M., Sporer, M., Schodl, B., Stranner, G., Schwaiger, E., Seuss, K., Weiss, P., Wieser, M., Zechmeister, A., Zether, G., 2012c. Austria's National Inventory Report 2012. Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and under the Kyoto Protocol. (No. R-0381). Umweltbundesamt, Wien, Österreich.

Umweltbundesamt, Anderl, M., Gangl, M., Jobstmann, H., Kampel, E., Köther, T., Mandl, N., Nagl, C., Pazdernik, K., Perl, S., Poupa, S., Schodl, B., Zechmeister, A., 2012d. Emissionstrends 1990–2010. Ein Überblick über die Verursacher von Luftschadstoffen in Österreich. (No. T-0393). Umweltbundesamt, Wien, Österreich.

Umweltbundesamt, Anderl, M., Gangl, M., Haider, S., Ibesich, N., Pazdernik, K., Poupa, S., Schenk, C., Zechmeister, A., 2012e. Bundesländer Luftschadstoff-Inventur 1990-2010. Regionalisierung der nationalen Emissionsdaten auf Grundlage von EU-Berichtspflichten. (No. R-0400). Umweltbundesamt, Wien, Österreich.

Umweltbundesamt, Spangl, W., Nagl, C., 2013. Jahresbericht der Luftgütemessungen in Österreich 2012 (No. R-0421). Umweltbundesamt, Wien, Österreich.

Umweltbundesamt, Anderl, M., Freudenschuß, A., Haider, S., Jobstmann, H., Köther, T., Lampert, C., Pazdernik, K., Pinterits, M., Poupa, S., Moosmann, L., Schmid, C., Schwaiger, E., Schwarzl, B., Stranner, G., Weiss, P., Zechmeister, A., 2014. Austria´s Annual Greenhouse Gas Inventory 1990-2012. (No. R-0452). Umweltbundesamt, Wien, Österreich.

Villani, M.G., Bergamaschi, P., Krol, M., Meirink, J.F., Dentener, F., 2010. Inverse modeling of European CH_4 emissions: sensitivity to the observational network. Atmos. Chem. Phys. 10, 1249–1267. doi:10.5194/acp-10-1249-2010

Volkamer, R., Jimenez, J.L., San Martini, F., Dzepina, K., Zhang, Q., Salcedo, D., Molina, L.T., Worsnop, D.R., Molina, M.J., 2006. Secondary organic aerosol formation from anthropogenic air pollution: Rapid and higher than expected. Geophysical Research Letters 33. doi:10.1029/2006GL026899

Wara, M., 2007. Is the global carbon market working? Nature 445, 595–596. doi:10.1038/445595a

Welti, N., Bondar-Kunze, E., Singer, G., Tritthart, M., Zechmeister-Boltenstern, S., Hein, T., Pinay, G., 2012. Large-scale controls on potential respiration and denitrification in riverine floodplains. Ecological Engineering 42, 73–84. doi:10.1016/j.ecoleng.2012.02.005

Winiwarter, W., 2007. National Greenhouse Gas Inventories: Understanding Uncertainties versus Potential for Improving Reliability. Water Air and Soil Pollution 7, 443–450. doi:10.1007/s11267-006-9117-3

Winiwarter, W., 2008. Quantifying Uncertainties of the Austrian Greenhouse Gas Inventory (Final report to project Nr. 1.S2.00116.0.0 contracted by Umweltbundesamt No. ARC_sys-0154), systems research. Austrian Research Center.

Winiwarter, W., Muik, B., 2010. Statistical dependence in input data of national greenhouse gas inventories: effects on the overall inventory uncertainty. Climatic Change 103, 19–36. doi:10.1007/s10584-010-9921-7

Winiwarter, W., Rypdal, K., 2001. Assessing the uncertainty associated with national greenhouse gas emission inventories: Atmospheric Environment 35, 5425–5440. doi:10.1016/S1352-2310(01)00171-6

Winiwarter, W., Ulbert G., Puxbaum, H., 2001a. A Simple Box Model to Simulate Local Formation of Secondary Organic Aerosol., in: Abstracts of the European Aerosol Conference. Presented at the European Aerosol Conference, Journal of Aerosol Sciences, Leipzig, pp. S757–S758.

Winiwarter, W., Trenker, C., Höflinger, W., 2001b. Österreichische Emissionsinventur für Staub. Report ARC--S-0151 im Auftrag des Umweltbundesamtes, ARC Seibersdorf research.

Winiwarter, W., Schmidt-Stejskal, H., Windsperger, A., 2007. Aktualisierung und methodische Verbesserung der österreichischen Luftschadstoffinventur für Schwebstaub. Report ARC–sys-0149, Austrian Research Centers, Vienna, Austria.

WMO, 2007. Scientific assessment of ozone depletion: 2006. World Meteorological Organisation, Global Ozone Research and Monitoring Project–Report 50.

WMO, 2011. Scientific assessment of ozone depletion: 2010. World Meteorological Organization, Geneva.

Wonaschütz, A., Hitzenberger, R., Bauer, H., Pouresmaeil, P., Klatzer, B., Caseiro, A., Puxbaum, H., 2009. Application of the Integrating Sphere Method to Separate the Contributions of Brown and Black Carbon in Atmospheric Aerosols. Environmental Science & Technology 43, 1141–1146. doi:10.1021/es8008503

Zellner, R., Gesellschaft Deutscher Chemiker, 2011. Chemie übber den Wolken: ... und darunter. Wiley-VCH, Weinheim.

Zhang, Q., Jimenez, J.L., Canagaratna, M.R., Allan, J.D., Coe, H., Ulbrich, I., Alfarra, M.R., Takami, A., Middlebrook, A.M., Sun, Y.L., Dzepina, K., Dunlea, E., Docherty, K., DeCarlo, P.F., Salcedo, D., Onasch, T., Jayne, J.T., Miyoshi, T., Shimono, A., Hatakeyama, S., Takegawa, N., Kondo, Y., Schneider, J., Drewnick, F., Borrmann, S., Weimer, S., Demerjian, K., Williams, P., Bower, K., Bahreini, R., Cottrell, L., Griffin, R.J., Rautiainen, J., Sun, J.Y., Zhang, Y.M., Worsnop, D.R., 2007. Ubiquity and dominance of oxygenated species in organic aerosols in anthropogenically-influenced Northern Hemisphere midlatitudes. Geophysical Research Letters 34. doi:10.1029/2007GL029979

Zhang, Q., Streets, D.G., Carmichael, G.R., He, K.B., Huo, H., Kannari, A., Klimont, Z., Park, I.S., Reddy, S., Fu, J.S., Chen, D., Duan, L., Lei, Y., Wang, L.T., Yao, Z.L., 2009. Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission. Atmos. Chem. Phys. 9, 5131–5153. doi:10.5194/acp-9-5131-2009

2.7 Anhang
2.7 Annex

Tabelle 2.A1 Offiziell berichtete Emissionen der Summe aller THG Österreichs (Umweltbundesamt, 2012c)

Table 2.A1 Total Austrian greenhouse gas emissions as officially reported by Umweltbundesamt (2012c)

	Basisjahr (1990)	1995	2000	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Änderung (letztes Jahr zu Basisjahr)
THG-Emissionen/Senken, nach Quell- und Senkengruppen	(Gg CO_2-Äq.)	(Gg CO_2-Äq.)	(Gg CO_2-Äq.)	(Gg CO_2-Äq.)	(Gg CO_2-Äq.)	(Gg CO_2-Äq.)	(Gg CO_2-Äq.)	(Gg CO_2-Äq.)	(Gg CO_2-Äq.)	%
1. Energie	**55397**	**57670**	**59251**	**72113**	**68944**	**65846**	**65000**	**60220**	**64328**	**16,12**
1.A. Verbrennung von Brennstoffen	55086	57317	58873	71672	68466	65354	64532	59681	63811	15,84
1.A.1. Energiewirtschaft	13842	12971	12275	16359	15254	13943	13736	12858	14293	3,26
1.A.2. Verarbeitendes Gewerbe	12774	13595	14003	16526	16265	16102	16104	14701	15618	22,27
1.A.3. Transport (Verkehr)	14030	16013	18970	25040	23737	23892	22604	21806	22452	60,03
1.A.4. Sonstige (Haushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen, Land-, Forstwirtschaft und Fischerei)	14405	14705	13583	13703	13165	11371	12041	10269	11401	–20,85
1.A.5. Andere Bereiche	36	33	42	45	45	46	46	47	47	31,79
1.B. Diffuse Emissionen aus Brennstoffen	311	353	378	441	478	491	469	539	516	66,20
2. Industrieprozesse	**10108**	**9897**	**10325**	**10623**	**10984**	**11460**	**11911**	**9675**	**10680**	**5,66**
3. Lösemittel und andere Produktverwendung	**512**	**422**	**425**	**387**	**415**	**388**	**367**	**299**	**327**	**–36,09**
4. Landwirtschaft	**8558**	**8721**	**7911**	**7412**	**7447**	**7512**	**7647**	**7632**	**7453**	**–12,92**
5. Landnutzung, Landnutzungsänderung & Forstwirtschaft	**–10023**	**–11597**	**–15036**	**–7395**	**–1583**	**–519**	**385**	**–3644**	**–3611**	**–63,97**
6. Abfall	**3587**	**3096**	**2558**	**2345**	**2269**	**2159**	**2030**	**1913**	**1806**	**–49,65**
7. Sonstige	**NA**	**NA**	**NA**	**NA**	**NA**	**NA**	**NA**	**NA**	**NA**	
Gesamte Emissionen mit Nettoemissionen von LULUCF	**68140**	**68209**	**65434**	**85484**	**88476**	**86847**	**87341**	**76095**	**80983**	**18,85**
Gesamte Emissionen ohne Nettoemissionen von LULUCF	**78162**	**79806**	**80470**	**92880**	**90059**	**87366**	**86956**	**79739**	**84594**	**8,23**

Tabelle 2.A2 Offiziell berichtete CO_2-Emissionen Österreichs (Umweltbundesamt, 2012c)
Table 2.A2 Austrian emissions of CO_2 as officially reported by Umweltbundesamt (2012c)

THG-Emissionen/Senken, nach Quell- und Senkengruppen	Basisjahr (1990)	1995	2000	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Änderung (letztes Jahr zu Basisjahr)
	(Gg CO_2)	(Gg CO_2)	(Gg CO_2)	(Gg CO_2)	(Gg CO_2)	(Gg CO_2)	(Gg CO_2)	(Gg CO_2)	(Gg CO_2)	%
1. Energie	**54171,69**	**56355,12**	**57991,22**	**70792,85**	**67660,35**	**64582,13**	**63752,74**	**59016,72**	**63088,31**	**16,46**
1.A. Verbrennung von Brennstoffen	54069,60	56227,97	57826,57	70587,69	67428,20	64344,97	63540,58	58751,56	62851,15	16,24
1.A.1. Energiewirtschaft	13792,28	12918,64	12221,05	16274,46	15159,58	13842,49	13627,84	12751,75	14173,77	2,77
1.A.2. Verarbeitendes Gewerbe	12685,28	13487,03	13860,68	16367,95	16100,60	15931,88	15932,80	14538,21	15455,70	21,84
1.A.3. Transport (Verkehr)	13772,38	15677,97	18625,31	24676,51	23401,42	23576,57	22323,08	21544,80	22205,42	61,23
1.A.4. Sonstige (Haushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen, Land-, Forstwirtschaft und Fischerei)	13784,66	14111,77	13078,73	13225,20	12722,54	10949,42	11611,69	9871,11	10969,98	−20,42
1.A.5. Andere Bereiche	35,01	32,56	40,80	43,56	44,06	44,61	45,17	45,70	46,27	32,19
1.B. Diffuse Emissionen aus Brennstoffen	102,09	127,15	164,65	205,15	232,16	237,16	212,16	265,16	237,17	132,31
2. Industrieprozesse	**7581,71**	**7387,93**	**7776,11**	**8705,79**	**9111,29**	**9544,40**	**9952,02**	**8051,45**	**9023,24**	**19,01**
3. Lösemittel und andere Produktverwendung	**279,30**	**189,95**	**192,62**	**212,99**	**250,73**	**228,07**	**210,69**	**153,46**	**176,89**	**−36,67**
4. Landwirtschaft										
5. Landnutzung, Landnutzungsänderung & Forstwirtschaft	**−10064,17**	**−11636,65**	**−15072,78**	**−7431,49**	**−1621,88**	**−561,49**	**337,25**	**−3693,53**	**−3660,75**	**−63,63**
6. Abfall	**26,89**	**10,97**	**12,26**	**12,26**	**10,15**	**8,12**	**6,09**	**4,06**	**2,03**	**−92,45**
7. Sonstige	**NA**	**NA**	**NA**	**NA**	**NA**	**NA**	**NA**	**NA**	**NA**	
Gesamte Emissionen mit Nettoemissionen von LULUCF	**51995,41**	**52307,32**	**50899,43**	**72292,40**	**75410,65**	**73801,23**	**74258,78**	**63532,16**	**68629,72**	**31,99**
Gesamte Emissionen ohne Nettoemissionen von LULUCF	**62059,59**	**63943,97**	**65972,21**	**79723,89**	**77032,53**	**74362,72**	**73921,54**	**67225,70**	**72290,47**	**16,49**

Tabelle 2.A3 Offiziell berichtete CH_4-Emissionen Österreichs (Umweltbundesamt, 2012c)

Table 2.A3 Austrian emissions of CH_4 as officially reported by Umweltbundesamt (2012c)

	Basisjahr (1990)	1995	2000	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Änderung (letztes Jahr zu Basisjahr)
THG-Emissionen/Senken, nach Quell- und Senkengruppen	(Gg CO_2-Äq.)	(Gg CO_2-Äq.)	(Gg CO_2-Äq.)	(Gg CO_2-Äq.)	(Gg CO_2-Äq.)	(Gg CO_2-Äq.)	(Gg CO_2-Äq.)	(Gg CO_2-Äq.)	(Gg CO_2-Äq.)	%
1. Energie	**669,86**	**653,90**	**529,23**	**509,57**	**496,55**	**491,49**	**496,24**	**499,76**	**527,61**	**–21,24**
1.A. Verbrennung von Brennstoffen	461,35	428,23	316,10	273,97	251,03	237,52	239,48	226,09	248,58	–46,12
1.A.1. Energiewirtschaft	3,38	3,28	3,38	5,24	6,17	6,23	6,56	7,20	7,80	130,56
1.A.2. Verarbeitendes Gewerbe	7,12	8,32	9,27	12,83	13,05	13,01	13,75	13,43	14,24	99,81
1.A.3. Transport (Verkehr)	64,48	64,74	40,27	28,03	24,30	21,37	18,03	16,20	15,06	–76,65
1.A.4. Sonstige (Haushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen, Land-, Forstwirtschaft und Fischerei)	386,33	351,86	263,15	227,84	207,48	196,87	201,10	189,23	211,45	–45,27
1.A.5. Andere Bereiche	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	26,94
1.B. Diffuse Emissionen aus Brennstoffen	208,51	225,67	213,13	235,60	245,52	253,97	256,76	273,67	279,03	33,82
2. Industrieprozesse	**14,83**	**14,41**	**14,67**	**15,79**	**19,33**	**19,05**	**18,63**	**17,75**	**18,25**	**23,04**
3. Lösemittel und andere Produktverwendung										
4. Landwirtschaft	**4192,85**	**4033,82**	**3793,41**	**3574,66**	**3560,70**	**3575,16**	**3560,50**	**3607,25**	**3597,84**	**–14,19**
5. Landnutzung, Landnutzungsänderung & Forstwirtschaft	**0,58**	**0,09**	**0,12**	**0,09**	**0,22**	**0,11**	**0,15**	**0,16**	**0,14**	**–75,50**
6. Abfall	**3427,11**	**2916,05**	**2288,40**	**1994,51**	**1901,61**	**1786,63**	**1656,09**	**1538,58**	**1430,81**	**–58,25**
7. Sonstige	**NA**	**NA**	**NA**	**NA**	**NA**	**NA**	**NA**	**NA**	**NA**	
Gesamte Emissionen mit Nettoemissionen von LULUCF	**8305,24**	**7618,27**	**6625,83**	**6094,62**	**5978,40**	**5872,44**	**5731,60**	**5663,51**	**5574,65**	**-32,88**
Gesamte Emissionen ohne Nettoemissionen von LULUCF	**8304,66**	**7618,18**	**6625,71**	**6094,53**	**5978,19**	**5872,33**	**5731,45**	**5663,35**	**5574,51**	**-32,87**

Tabelle 2.A4 Offiziell berichtete N_2O-Emissionen Österreichs (Umweltbundesamt, 2012c)
Table 2.A4 Austrian emissions of N_2O as officially reported by Umweltbundesamt (2012c)

	Basisjahr (1990)	1995	2000	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Änderung (letztes Jahr zu Basisjahr)
THG-Emissionen/Senken, nach Quell- und Senkengruppen	(Gg CO_2-Äq.)	(Gg CO_2-Äq.)	(Gg CO_2-Äq.)	(Gg CO_2-Äq.)	(Gg CO_2-Äq.)	(Gg CO_2-Äq.)	(Gg CO_2-Äq.)	(Gg CO_2-Äq.)	(Gg CO_2-Äq.)	%
1. Energie	**555,34**	**660,84**	**730,33**	**810,44**	**787,02**	**771,93**	**751,46**	**703,37**	**711,74**	**28,16**
1.A. Verbrennung von Brennstoffen	555,34	660,84	730,33	810,44	787,02	771,93	751,46	703,37	711,74	28,16
1.A.1. Energiewirtschaft	46,10	48,90	51,01	78,93	88,50	94,40	101,22	98,78	111,38	141,62
1.A.2. Verarbeitendes Gewerbe	81,13	99,21	132,67	145,18	151,62	157,50	157,95	149,49	148,42	82,93
1.A.3. Transport (Verkehr)	193,25	270,56	304,55	335,43	310,82	294,36	263,24	244,96	231,26	19,67
1.A.4. Sonstige (Haushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen, Land-, Forstwirtschaft und Fischerei)	233,98	241,34	241,10	249,86	235,07	224,67	228,07	209,15	219,67	–6,12
1.A.5. Andere Bereiche	0,87	0,84	1,01	1,02	1,01	1,00	0,99	1,00	1,01	15,95
1.B. Diffuse Emissionen aus Brennstoffen	IE,NA	IE,NA	IE,NA	IE,NA	IE,NA	IE,NA	IE,NA	IE,NA	IE,NA	
2. Industrieprozesse	**912,02**	**857,20**	**951,62**	**274,16**	**280,12**	**270,01**	**325,81**	**165,39**	**63,49**	**–93,04**
3. Lösemittel und andere Produktverwendung	**232,50**	**232,50**	**232,50**	**173,60**	**164,30**	**160,27**	**156,55**	**145,70**	**150,23**	**–35,39**
4. Landwirtschaft	**4365,12**	**4686,84**	**4117,52**	**3837,46**	**3886,43**	**3937,28**	**4086,65**	**4024,38**	**3854,80**	**–11,69**
5. Landnutzung, Landnutzungsänderung & Forstwirtschaft	**41,03**	**39,16**	**36,80**	**35,96**	**38,58**	**42,81**	**47,62**	**48,90**	**49,89**	**21,58**
6. Abfall	**133,28**	**169,44**	**257,51**	**337,92**	**357,05**	**364,55**	**367,72**	**370,67**	**373,21**	**180,02**
7. Sonstige	**NA**	**NA**	**NA**	**NA**	**NA**	**NA**	**NA**	**NA**	**NA**	
Gesamte Emissionen mit Nettoemissionen von LULUCF	**6239,28**	**6645,98**	**6326,28**	**5469,55**	**5513,49**	**5546,85**	**5735,82**	**5458,40**	**5203,35**	**–16,60**
Gesamte Emissionen ohne Nettoemissionen von LULUCF	**6198,25**	**6606,82**	**6289,48**	**5433,59**	**5474,91**	**5504,04**	**5688,19**	**5409,51**	**5153,46**	**–16,86**

Tabelle 2.A5 Offiziell berichtete Emissionen der fluorierten Gase in Österreich (Umweltbundesamt, 2012c)

Table 2.A5 Austrian emissions of fluorinated gases as officially reported by Umweltbundesamt (2012c)

	Basisjahr (1990)	1995	2000	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Änderung (letztes Jahr zu Basisjahr)
THG-Emissionen/Senken, nach Quell- und Senkengruppen	(Gg CO_2-Äq.)	(Gg CO_2-Äq.)	(Gg CO_2-Äq.)	(Gg CO_2-Äq.)	(Gg CO_2-Äq.)	(Gg CO_2-Äq.)	(Gg CO_2-Äq.)	(Gg CO_2-Äq.)	(Gg CO_2-Äq.)	%
Emissionen von HFCs	26,32	411,88	901,85	986,36	962,57	1061,91	1057,99	1056,61	1160,63	4309,55
Emissionen vonPFCs	1079,24	71,27	84,79	133,82	145,72	190,12	173,53	35,05	69,85	–93,53
Emissionen von SF6	494,28	1.154,06	595,54	507,33	465,15	374,54	382,84	349,14	345,01	–30,20
Gesamtemissionen von F-Gasen	**1599,84**	**1637,21**	**1582,18**	**1627,51**	**1573,44**	**1626,57**	**1614,35**	**1440,80**	**1575,49**	**–1,52**

Tabelle 2.A6 Aufteilung der österreichischen THG Emissionen nach Bundesländer n(Quelle: Umweltbundesamt, 2012e)

Table 2.A6 Austrian greenhouse gas emissions – shares by province (Umweltbundesamt, 2012e)

EMISSIONEN (ohne Sektor LULUCF) in %					
2010	CO_2	CH_4	N_2O	F-Gase	Summe
Österreich	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**
Burgenland	2	2	5	3	2
Kärnten	5	9	7	14	5
Niederösterreich	24	24	30	18	24
Oberösterreich	28	24	25	15	27
Salzburg	5	7	6	6	5
Steiermark	15	18	16	14	15
Tirol	7	10	6	8	7
Vorarlberg	2	3	2	4	2
Wien	13	2	3	19	12

Tabelle 2.A7 Österreichische THG Emissionen pro Kopf nach Bundesländern (Quelle: Umweltbundesamt, 2012e, Bevölkerungszahl nach Statistik Austria)

Table 2.A7 Austrian per-capita greenhouse gas emissions by province (Umweltbundesamt, 2012e; population from Statistics Austria)

EMISSIONEN PRO KOPF (ohne Sektor LULUCF) in Tonnen CO_2-Äq.					
2010	CO_2	CH_4	N_2O	F-Gase	Summe
Österreich	**8,63**	**0,67**	**0,62**	**0,19**	**10,10**
Burgenland	4,93	0,49	0,87	0,17	6,46
Kärnten	6,32	0,85	0,65	0,40	8,23
Niederösterreich	10,73	0,84	0,98	0,17	12,72
Oberösterreich	14,41	0,95	0,90	0,17	16,43
Salzburg	6,20	0,75	0,54	0,17	7,66
Steiermark	9,05	0,84	0,67	0,18	10,74
Tirol	6,66	0,79	0,46	0,17	8,08
Vorarlberg	4,34	0,50	0,31	0,17	5,32
Wien	5,44	0,06	0,10	0,17	5,77

Tabelle 2.A8 Offiziell berichtete Zeitreihen von Emissionen aller THG mit Nettoemissionen von LULUCF in unterschiedlichen Weltregionen (http://unfccc.int/ghg_data/ghg_data_unfccc/time_series_annex_i/items/3814.php)

Table 2.A8 Time series of total greenhouse gas emissions including LULUCF in different countries/regions (http://unfccc.int)

	Basisjahr (1990)	1995	2000	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Änderung (letztes Jahr zu Basisjahr)
	(Gg CO_2-Äq.)	(Gg CO_2-Äq.)	(Gg CO_2-Äq.)	(Gg CO_2-Äq.)	(Gg CO2-Äq.)	(Gg CO_2-Äq.)	(Gg CO_2-Äq.)	(Gg CO_2-Äq.)	(Gg CO_2-Äq.)	%
Österreich	68140	68209	65434	85484	88476	86847	87341	76095	80983	18,8
Europäische Union (15)	4082877	3963894	3941288	4007914	3 948 768	3911824	3813125	3521123	3619627	–11,3
Europäische Union (27)	5297.109	4912597	4780386	4848362	4812225	4780501	4652647	4268118	4409255	–16,8
Russische Föderation	3428751	1965908	1575148	1577307	1648903	1622226	1630910	1459840	1549281	–54,8
Schweiz	49210	46637	52137	52539	53429	51266	53031	51362	53367	8,4
Vereinigte Staaten	5293369	5727304	6424130	6118282	6048940	6144525	5960866	5545717	5747137	8,6

Tabelle 2.A9 Ländervergleich der CO_2-Emissionen pro Kopf (www.unfccc.int; Chen und Zhang, 2010)

Table 2.A9 Per-capita emissions of CO_2 in different countries by source sector (www.unfccc.int, Chen and Zhang, 2010)

CO_2, 2010	Österreich	EU 27	USA	Russ. Föderation	Schweiz	China (2007)
THG-Emissionen/Senken, nach Quell- und Senkengruppen	(kg/Kopf)	(kg/Kopf)	(kg/Kopf)	(kg/Kopf)	(kg/Kopf)	(kg/Kopf)
1. Energie	**7532,7**	**7287,2**	**17774,9**	**10181,8**	**5577,6**	**3547,0**
1.A. Verbrennung von Brennstoffen	7504,4	7247,4	17670,5	9947,4	5568,1	
1.A.1. Energiewirtschaft	1692,3	2817,5	7261,5	6267,3	525,1	
1.A.2. Verarbeitendes Gewerbe	1845,4	1151,5	2487,8	970,8	763,3	
1.A.3. Transport (Verkehr)	2651,3	1833,2	5520,6	1577,8	2089,1	
1.A.4. Sonstige (Haushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen, Land-, Forstwirtschaft und Fischerei)	1309,8	1427,1	1805,4	948,9	2175,3	
1.A.5. Andere Bereiche	5,5	18,2	595,3	182,6	15,4	
1.B. Diffuse Emissionen aus Brennstoffen	28,3	39,7	104,4	234,4	9,5	
2. Industrieprozesse	**1077,4**	**458,3**	**446,9**	**1080,4**	**302,5**	**1248,3**
3. Lösemittel und andere Produktverwendung	**21,1**	**14,3**			**20,2**	
4. Landwirtschaft						
5. Landnutzung, Landnutzungsänderung & Forstwirtschaft	**–437,1**	**–638,1**	**–3408,3**	**–4736,7**	**–113,7**	
6. Abfall	**0,2**	**5,4**			**1,4**	
Gesamte Emissionen mit Nettoemissionen von 5	**8194,3**	**7127,1**	**14813,5**	**6525,6**	**5789,7**	
Gesamte Emissionen ohne Nettoemissionen von 5	**8631,4**	**7765,3**	**18221,8**	**11262,3**	**5903,4**	**4795,3**

Tabelle 2.A10 Ländervergleich der CH_4-Emissionen pro Kopf in CO_2-Äquivalent (www.unfccc.int; Chen und Zhang, 2010)

Table 2.A10 Per-capita emissions of CH_4 in different countries by source sector listed as CO_2-equivalent (www.unfccc.int, Chen and Zhang, 2010)

CH_4, 2010	Österreich	EU 27	USA	Russ. Föderation	Schweiz	China (2007)
THG-Emissionen/Senken, nach Quell- und Senkengruppen	(kg CO_2-Äq./Kopf)	(kg CO_2-Äq./Kopf)	(kg CO_2-Äq./Kopf)	(kg CO_2-Äq./Kopf)	(kg CO_2-Äq./Kopf)	(kg CO_2-Äq./Kopf)
1. Energie	**63,0**	**152,2**	**1062,9**	**2624,1**	**34,9**	**311,3**
1.A. Verbrennung von Brennstoffen	29,7	40,2	26,3	23,9	12,5	1,3
1.A.1. Energiewirtschaft	0,9	6,0	1,5	3,1	0,4	
1.A.2. Verarbeitendes Gewerbe	1,7	3,5	5,4	2,7	1,1	
1.A.3. Transport (Verkehr)	1,8	3,2	5,0	4,8	3,1	
1.A.4. Sonstige (Haushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen, Land-, Forstwirtschaft und Fischerei)	25,2	27,5	14,3	8,6	7,9	
1.A.5. Andere Bereiche	0,0	0,1	0,2	4,6	0,0	
1.B. Diffuse Emissionen aus Brennstoffen	33,3	112,0	1036,5	2600,2	22,3	310,0
2. Industrieprozesse	**2,2**	**2,3**	**4,6**	**4,7**	**1,1**	
3. Lösemittel und andere Produktverwendung						
4. Landwirtschaft	**429,6**	**396,3**	**646,6**	**311,7**	**410,1**	**290,6**
5. Landnutzung, Landnutzungsänderung & Forstwirtschaft	**0,0**	**9,3**	**15,5**	**75,0**	**0,0**	
6. Abfall	**170,8**	**248,8**	**402,2**	**482,4**	**43,9**	**22,1**
Gesamte Emissionen mit Nettoemissionen von 5	**665,6**	**808,9**	**2131,8**	**3498,0**	**490,1**	
Gesamte Emissionen ohne Nettoemissionen von 5	**665,6**	**799,6**	**2116,3**	**3422,9**	**490,1**	**624,0**

Tabelle 2.A11 Ländervergleich der N_2O-Emissionen pro Kopf in CO_2-Äquivalent (www.unfccc.int; Chen und Zhang, 2010)

Table 2.A11 Per-capita emissions of N_2O in different countries by source sector listed as CO_2-equivalent (www.unfccc.int, Chen and Zhang, 2010)

N_2O, 2010	Österreich	EU 27	USA	Russ. Föderation	Schweiz	China (2007)
THG-Emissionen/Senken, nach Quell- und Senkengruppen	(kg CO_2-Äq./Kopf)	(kg CO_2-Äq./Kopf)	(kg CO_2-Äq./Kopf)	(kg CO_2-Äq./Kopf)	(kg CO_2-Äq./Kopf)	(kg CO_2-Äq./Kopf)
1. Energie	**85,0**	**69,8**	**139,3**	**47,7**	**41,3**	**16,0**
1.A. Verbrennung von Brennstoffen	85,0	69,6	139,3	46,9	41,2	16,0
1.A.1. Energiewirtschaft	13,3	20,8	60,2	13,3	12,7	
1.A.2. Verarbeitendes Gewerbe	17,7	12,1	13,9	4,1	4,3	
1.A.3. Transport (Verkehr)	27,6	21,0	60,3	26,6	17,3	
1.A.4. Sonstige (Haushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen, Land-, Forstwirtschaft und Fischerei)	26,2	14,9	4,0	1,7	6,8	
1.A.5. Andere Bereiche	0,1	0,8	0,9	1,2	0,2	
1.B. Diffuse Emissionen aus Brennstoffen		0,2		0,8	0,1	
2. Industrieprozesse	**7,6**	**35,8**	**62,5**	**32,1**	**7,7**	**17,3**
3. Lösemittel und andere Produktverwendung	**17,9**	**8,9**	**14,0**	**4,0**	**7,4**	
4. Landwirtschaft	**460,3**	**524,8**	**723,6**	**656,5**	**320,5**	**143,1**
5. Landnutzung, Landnutzungsänderung & Forstwirtschaft	**6,0**	**7,0**	**18,3**	**64,2**	**0,6**	
6. Abfall	**44,6**	**28,2**	**21,7**	**29,8**	**33,3**	
Gesamte Emissionen mit Nettoemissionen von 5	**621,3**	**674,5**	**979,5**	**834,3**	**412,5**	
Gesamte Emissionen ohne Nettoemissionen von 5	**615,3**	**667,5**	**961,2**	**770,1**	**411,9**	**176,4**

Tabelle 2.A12 Ländervergleich der gesamten THG-Emissionen pro Kopf (inkl. F-Gase) in CO_2-Äquivalent (www.unfccc.int; Chen und Zhang, 2010)

Table 2.A12 Per-capita emissions of total greenhouse gas emissions including fluorinated gases in different countries by source sector listed as CO_2-equivalent (www.unfccc.int; Chen and Zhang, 2010)

THG-Summen, 2010	Österreich	EU 27	USA	Russ. Föderation	Schweiz	China (2007)
THG-Emissionen/Senken, nach Quell- und Senkengruppen	(kg CO_2-Äq./Kopf)	(kg CO_2-Äq./Kopf)	(kg CO_2-Äq./Kopf)	(kg CO_2-Äq./Kopf)	(kg CO_2-Äq./Kopf)	(kg CO_2-Äq./Kopf)
1. Energie	**7681**	**7509**	**18977**	**12854**	**5654**	**3874**
1.A. Verbrennung von Brennstoffen	7619	7357	17836	10018	5622	17
1.A.1. Energiewirtschaft	1707	2844	7323	6284	538	
1.A.2. Verarbeitendes Gewerbe	1865	1167	2507	978	769	
1.A.3. Transport (Verkehr)	2681	1857	5586	1609	2110	
1.A.4. Sonstige (Haushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen, Land-, Forstwirtschaft und Fischerei)	1361	1469	1824	959	2190	
1.A.5. Andere Bereiche	6	19	596	188	16	
1.B. Diffuse Emissionen aus Brennstoffen	62	152	1141	2836	32	310
2. Industrieprozesse	**1275**	**685**	**970**	**1218**	**474**	**1266**
3. Lösemittel und andere Produktverwendung	**39**	**23**	**14**	**4**	**28**	
4. Landwirtschaft	**890**	**921**	**1370**	**968**	**731**	**434**
5. Landnutzung, Landnutzungsänderung & Forstwirtschaft	**–431**	**–622**	**–3374**	**–4597**	**–113**	
6. Abfall	**216**	**282**	**424**	**512**	**79**	**22**
Gesamte Emissionen mit Nettoemissionen von 5	**9669**	**8799**	**18381**	**10958**	**6855**	
Gesamte Emissionen ohne Nettoemissionen von 5	**10100**	**9421**	**21756**	**15556**	**6968**	**5596**
davon: Emissionen der F-Gase (Industrieprozesse)	188	188	456	101	162	

Tabelle 2.A13 Zusammenfassung Literaturdaten zu Rußemissionen aus Kleinfeuerungen (Quelle: siehe Tabelle)
Table 2.A13 Measured emission factors of elemental carbon from small combustion sources (source: see table)

	Feuerung / Art der Verbrennung	Brennstoffzufuhr	Brennstoff	Betriebsart	Fraktion	EC [% von PM]	EC [mg/MJ fuel]	EC Analyse
Schmidl et al., 2008a	Kachelofen	man	SH Buche	Feldtest	PM10	19	-	T
	Kachelofen	man	SH Eiche	Feldtest	PM10	15	-	T
	Kachelofen	man	SH Fichte	Feldtest	PM10	21	-	T
	Kachelofen	man	SH Lärche	Feldtest	PM10	10	-	T
	Kachelofen	man	BR Weichholz	Feldtest	PM10	31	-	T
Schmidl et al., 2008b	Offen	man	Laub	Feldtest	PM10	3	-	T
						6	-	TLT
						ND	-	IS
	Offen	man	Laub	Feldtest	PM10	2	-	T
						11	-	TLT
						ND	-	IS
Schmidl et al., 2011	PE-Ofen 6kW	auto	PE Holz	Labor Start	PM10	16	1,3	TLT
	PE-Ofen 6kW	auto	PE Holz	Labor Nennlast	PM10	14	1,1	TLT
	PE-Ofen 6kW	auto	PE Holz	Labor Teillast	PM10	14	0,4	TLT
	PE/HG Kessel 40kW	auto	HG Weichholz	Labor Start	PM10	23	6,5	TLT
	PE/HG Kessel 40kW	auto	HG Weichholz	Labor Nennlast	PM10	0,5	0,1	TLT
	PE/HG Kessel 40kW	auto	HG Weichholz	Labor Teillast	PM10	33	5,8	TLT
	PE/HG Kessel 40kW	auto	PE Energiekorn	Labor Start	PM10	18	20	TLT
	PE/HG Kessel 40kW	auto	PE Energiekorn	Labor Nennlast	PM10	0,5	0,5	TLT
	PE/HG Kessel 40kW	auto	PE Energiekorn	Labor Teillast	PM10	17	22	TLT
	PE/HG Kessel 40kW	auto	PE Miscanthus	Labor Start	PM10	45	10	TLT
	PE/HG Kessel 40kW	auto	PE Miscanthus	Labor Nennlast	PM10	1,0	0,1	TLT
	PE/HG Kessel 40kW	auto	PE Miscanthus	Labor Teillast	PM10	43	6,3	TLT
	PE/HG Kessel 40kW	auto	PE Holz	Labor Start	PM10	25	8,3	TLT
	PE/HG Kessel 40kW	auto	PE Holz	Labor Nennlast	PM10	0,2	0,0	TLT
	PE/HG Kessel 40kW	auto	PE Holz	Labor Teillast	PM10	55	11	TLT
	SH Ofen 6,5kW	man	BR Weichholz	Labor praxisnah	PM10	37	35	TLT
	SH Ofen 6,5kW	man	SH Buche	Labor praxisnah	PM10	32	24	TLT
	SH Ofen 6,5kW	man	SH Eiche	Labor praxisnah	PM10	24	15	TLT
	SH Ofen 6,5kW	man	SH Fichte	Labor praxisnah	PM10	29	28	TLT
	SH Ofen 6,5kW	man	SH Fichte	Labor Fehlbed. Luft	PM10	17	51	TLT
	SH Ofen 6,5kW	man	SH Fichte	Labor Fehlbed. Brennst.	PM10	40	44	TLT
	SH Ofen 6kW	man	BR Weichholz	Labor praxisnah	PM10	38	27	TLT
	SH Ofen 6kW	man	SH Buche	Labor praxisnah	PM10	37	33	TLT
	SH Ofen 6kW	man	SH Eiche	Labor praxisnah	PM10	30	21	TLT
	SH Ofen 6kW	man	SH Fichte	Labor praxisnah	PM10	33	26	TLT
	SH Ofen 6kW	man	SH Fichte	Labor Fehlbed. Luft	PM10	7,3	6,7	TLT
	SH Ofen 6kW	man	SH Fichte	Labor Fehlbed. Brennst.	PM10	42	20	TLT

	Feuerung / Art der Verbrennung	Brennstoffzufuhr	Brennstoff	Betriebsart	Fraktion	EC [% von PM]	EC [mg/MJ fuel]	EC Analyse
Kelz et al., 2012	PE Kessel "modern" 20kW	auto	PE Holz	Labor praxisnah	PM1	nd	nd	T
	HG Kessel "modern" 30kW	auto	HG Weichholz	Labor praxisnah	PM1	12	1,5	T
	SH Kessel "modern" 30kW	man	SH Hartholz	Labor praxisnah	PM1	nd	nd	T
	Kachelofen 4,2kW	man	SH Hartholz	Labor praxisnah	PM1	44	12	T
	SH Ofen 6kW	man	SH Hartholz	Labor praxisnah	PM1	69	31	T
	SH Ofen "low cost" 6,5kW	man	SH Hartholz	Labor praxisnah	PM1	70	46	T
	SH Kessel "alt"	man	SH Hartholz	Labor praxisnah	PM1	41	38	T

Legende: SH … Scheitholz, PE … Pellets, HG … Hackgut, T … thermisch, TLT … Thermo-optisch, IS … Integrierende Kugel, man … manuell, auto … automatisch, ND … keine Daten, PM1 … Partikel < 1 µm

Tabelle 2.A14 PM10 Emissionen in Österreich (www.ceip.at)
Table 2.A14 Austrian emissions of PM10 (www.ceip.at)

	1990	1995	2000	2005	2006	2007	2008	2009	2010
	PM10	PM10	PM10	PM10	PM10	PM10	PM10	PM10	PM10
	(Gg)	(Gg)	(Gg)	(Gg)	(Gg)	(Gg)	(Gg)	(Gg)	(Gg)
1. Energie	23,04	23,01	22,68	23,36	22,58	22,29	22,20	21,07	21,60
1.A. Verbrennung von Brennstoffen	22,73	22,75	22,41	23,07	22,30	22,04	21,96	20,88	21,38
1.A.1. Energiewirtschaft	0,98	0,82	0,66	0,93	1,12	1,19	1,26	1,25	1,36
1.A.2. Verarbeitendes Gewerbe	2,49	2,14	2,59	2,88	3,03	3,25	3,46	3,43	3,41
1.A.3. Transport (Verkehr)	6,38	7,90	8,65	9,38	8,89	8,60	8,04	7,53	7,34
1.A.4. Sonstige (Haushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen, Land-, Forstwirtschaft und Fischerei)	12,88	11,86	10,50	9,87	9,25	8,99	9,19	8,65	9,26
1.A.5. Andere Bereiche	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
1.B. Diffuse Emissionen aus Brennstoffen	0,30	0,26	0,26	0,29	0,28	0,25	0,24	0,18	0,22
2. Industrieprozesse	10,45	9,97	9,92	8,74	8,02	7,71	8,30	7,69	7,56
3. Lösemittel und andere Produktverwendung	0,41	0,42	0,42	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
4. Landwirtschaft	5,81	5,72	5,63	5,56	5,55	5,50	5,48	5,47	5,46
6. Abfall	0,07	0,08	0,04	0,09	0,09	0,10	0,08	0,08	0,08
7. Sonstige	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Gesamt	**39,77**	**39,19**	**38,69**	**38,18**	**36,68**	**36,04**	**36,50**	**34,75**	**35,15**

Tabelle 2.A15 PM2.5 Emissionen in Österreich (www.ceip.at)

Table 2.A15 Austrian emissions of PM2.5 (www.ceip.at)

	1990	1995	2000	2005	2006	2007	2008	2009	2010
	PM2.5	PM2.5	PM2.5	PM2.5	PM2.5	PM2.5	PM2.5	PM2.5	PM2.5
	(Gg)	(Gg)	(Gg)	(Gg)	(Gg)	(Gg)	(Gg)	(Gg)	(Gg)
1. Energie	19,11	18,99	18,47	18,72	17,83	17,45	17,25	16,27	16,68
1.A. Verbrennung von Brennstoffen	19,02	18,91	18,38	18,63	17,74	17,37	17,18	16,21	16,61
1.A.1. Energiewirtschaft	0,83	0,71	0,56	0,80	0,95	1,01	1,07	1,06	1,15
1.A.2. Verarbeitendes Gewerbe	2,08	1,78	2,10	2,21	2,26	2,41	2,54	2,51	2,51
1.A.3. Transport (Verkehr)	4,42	5,65	6,18	6,69	6,15	5,82	5,27	4,82	4,60
1.A.4. Sonstige (Haushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen, Land-, Forstwirtschaft und Fischerei)	11,67	10,76	9,52	8,92	8,36	8,11	8,29	7,81	8,34
1.A.5. Andere Bereiche	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
1.B. Diffuse Emissionen aus Brennstoffen	0,09	0,08	0,08	0,09	0,09	0,08	0,08	0,06	0,07
2. Industrieprozesse	3,24	2,61	2,40	1,83	1,58	1,39	1,51	1,38	1,39
3. Lösemittel und andere Produktverwendung	0,41	0,42	0,42	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
4. Landwirtschaft	1,40	1,37	1,34	1,32	1,31	1,31	1,30	1,30	1,29
6. Abfall	0,02	0,02	0,01	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
7. Sonstige	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Gesamt	**24,18**	**23,42**	**22,64**	**22,34**	**21,19**	**20,62**	**20,53**	**19,42**	**19,83**

Tabelle 2.A16 Emissionen der Bundesländer im Vergleich (Umweltbundesamt, 2012d, 2012e)
Table 2.A16 Austrian PM emissions by province (Umweltbundesamt, 2012d, 2012e)

	PM-Emissionen in (Mg)		PM-Emissionen (%)		PM-Emissionen in (kg / Person)	
2010	PM2.5	PM10	PM2.5	PM10	PM2.5	PM10
Österreich	**19 830**	**35 150**	**100**	**100**	**2,37**	**4,20**
Burgenland	946	1 623	5	5	3,33	5,72
Kärnten	1 858	3 060	9	9	3,32	5,47
Niederösterreich	4 996	9 241	25	26	3,11	5,75
Oberösterreich	4 061	7 414	20	21	2,88	5,25
Salzburg	1 281	2 149	6	6	2,42	4,06
Steiermark	3 109	5 747	16	16	2,57	4,76
Tirol	1 709	2 822	9	8	2,42	3,99
Vorarlberg	586	1 038	3	3	1,59	2,81
Wien	1 284	2 058	6	6	0,76	1,21

Tabelle 2.A17 Vergleich der PM2.5 Emissionen pro Kopf in verschiedenen Staaten (www.ceip.at; www.epa.gov; Zhang et al., 2009)
Table 2.A17 Per-capita emissions of PM2.5 in different countries by source sector (www.ceip.at; www.epa.gov; Zhang et al., 2009)

	2010	2010	2010	2010	2010	2006
	Österreich	EU27	USA	Russische Föderation	Schweiz	China
	PM2.5	PM2.5	PM2.5	PM2.5	PM2.5	PM2.5
	(kg / Kopf)	(kg / Kopf)	(kg / Kopf)	(kg / Kopf)	(kg / Kopf)	(kg / Kopf)
1. Energie	1,99	2,22	3,80	1,88	0,93	10,01
1.A. Verbrennung von Brennstoffen	1,98	2,20	3,80	1,63	0,93	10,01
1.A.1. Energiewirtschaft	0,14	0,13	0,88	0,56	0,06	1,11
1.A.2. Verarbeitendes Gewerbe	0,30	0,20	0,43	0,59	0,20	5,23
1.A.3. Transport (Verkehr)	0,55	0,49	1,42	0,36	0,23	0,30
1.A.4. Sonstige (Haushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen, Land-, Forstwirtschaft und Fischerei)	1,00	1,37	1,07	0,11	0,43	3,37
1.A.5. Andere Bereiche	0,00	0,00	0,00		0,00	
1.B. Diffuse Emissionen aus Brennstoffen	0,01	0,03	0,00	0,25		
2. Industrieprozesse	0,17	0,28	1,32	0,46	0,13	IE
3. Lösemittel und andere Produktverwendung	0,05	0,03	0,01	0,02	0,03	
4. Landwirtschaft	0,15	0,08	0,00	0,06	0,16	
6. Abfall	0,00	0,04	0,59	0,01	0,00	
7. Sonstiges		0,01	11,63	0,17	0,00	
Gesamt	**2,37**	**2,66**	**17,36**	**2,59**	**1,25**	**10,01**

IE … (included elsewhere): in "verarbeitendes Gewerbe" enthalten; bei USA: Originaldaten aus "short tons" umgerechnet

Tabelle 2.A18 Vergleich der PM10 Emissionen pro Kopf in verschiedenen Staaten (www.ceip.at; www.epa.gov; Zhang et al., 2009)
Table 2.A18 Per-capita emissions of PM10 in different countries by source sector (www.ceip.at; www.epa.gov; Zhang et al., 2009)

	2010	2010	2010	2010	2010	2006
	Österreich	EU27	USA	Russische Föderation	Schweiz	China
	PM10	PM10	PM10	PM10	PM10	PM10
	(kg / Kopf)	(kg / Kopf))	(kg / Kopf)	(kg / Kopf)	(kg / Kopf)	(kg / Kopf)
1. Energie	2,58	2,81	4,62	2,66	1,78	13,75
1.A. Verbrennung von Brennstoffen	2,55	2,75	4,62	2,29	1,78	13,75
1.A.1. Energiewirtschaft	0,16	0,22	1,16	0,85	0,06	1,87
1.A.2. Verarbeitendes Gewerbe	0,41	0,25	0,55	0,88	0,39	7,88
1.A.3. Transport (Verkehr)	0,88	0,64	1,82	0,44	0,68	0,32
1.A.4. Sonstige (Haushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen, Land-, Forstwirtschaft und Fischerei)	1,11	1,63	1,09	0,13	0,64	3,69
1.A.5. Andere Bereiche	0,00	0,00	0,00		0,00	
1.B. Diffuse Emissionen aus Brennstoffen	0,03	0,07	0,00	0,37		
2. Industrieprozesse	0,90	0,60	3,54	0,69	0,31	IE
3. Lösemittel und andere Produktverwendung	0,05	0,04	0,01	0,03	0,05	
4. Landwirtschaft	0,65	0,41	0,00	0,38	0,42	
6. Abfall	0,01	0,06	0,69	0,01	0,04	
7. Sonstiges		0,01	53,61	0,25	0,03	
Gesamt	**4,20**	**3,93**	**62,48**	**4,01**	**2,63**	**13,75**

IE … (included elsewhere): in "verarbeitendes Gewerbe" enthalten; bei USA: Originaldaten aus "short tons" umgerechnet

Band 1 Kapitel 3: Vergangene Klimaänderung in Österreich

Volume 1 Chapter 3: Past Climate Change in Austria

Koordinierende LeitautorInnen

Ingeborg Auer, Ulrich Foelsche

LeitautorInnen

Reinhard Böhm†, Barbara Chimani, Leopold Haimberger, Hanns Kerschner, Karin A. Koinig, Kurt Nicolussi, Christoph Spötl

Beiträge von

Gerhard Diendorfer, Reinhold Godina, Michael Hofstätter, Anita Jurkovic, August Kaiser, Gottfried Kirchengast, Elisabeth Koch, Andrea Ladinig, Christoph Matulla, Marc Olefs, Roland Potzmann, Wolfgang Schöner, Stana Simic, Wolfgang Spangl, Viktor Weilguni

Für den Begutachtungsprozess

Sabine McCallum

Inhalt

ZUSAMMENFASSUNG

Das Klima der aktuellen erdgeschichtlichen Periode, des Quartärs, war ein Wechselspiel von langen Glazialzeiten („Kaltzeiten“) und kurzen Interglazialzeiten („Warmzeiten“), gesteuert durch Schwankungen der Erdbahn-Parameter (Form der Erdbahn, Neigung und Orientierung der Rotationsachse der Erde). Innerhalb dieser Rahmenbedingungen leben wir derzeit in einer Warmzeit. Die aus den Eisbohrkernen Grönlands bekannten Dansgaard-Oeschger-Ereignisse (Wechsel zwischen sehr kalten Stadialen und – vergleichsweise – milden Interstadialen) hatten ihren Ursprung in den Instabilitäten der großen Eisschilde und deren Interaktion mit der Tiefenwasserströmung im Atlantik. Diese gewaltigen und rapiden Klimaschwankungen prägten auch das Klima im Alpenraum. Gegen Ende des letzten Glazials (Würm) begann vor etwa 30 000 Jahren ein Gletschervorstoß bis über den Alpenrand hinaus, verbunden mit einer Absenkung der Jahresmitteltemperatur um mindestens 10 °C im Vergleich zum Holozän. Dieses Eisstromnetz im Alpenvorland und in den großen Alpentälern zerfiel vor etwa 19 000 Jahren relativ rasch. Vor 14 700 Jahren begann wiederum eine Zeit mit deutlich günstigeren interstadialen Bedingungen, verbunden mit der Wiederausbreitung der Wälder in den Alpentälern. Der Klimarückschlag der Jüngeren Dryas, der letzten großen Kaltphase auf der Nordhalbkugel, begann vor 12 900 Jahren und endete binnen weniger Jahrzehnte vor etwa 11 700 Jahren. In den ersten zwei Dritteln des Holozäns (Nacheiszeit) lagen die Temperaturwerte meist über dem Mittel des 20. Jahrhunderts, verbunden mit einer vergleichsweise geringen Ausdehnung der Gletscher im Alpenraum. Nach den früh- bis mittelholozänen Maxima (bis vor ca. 7 000 Jahren) nahmen die Temperaturen bis in die vorindustrielle Zeit um etwa 2 °C ab. Unbestrittene Ursache dafür ist die Abnahme der Insolation auf der Nordhemisphäre im Sommer, verursacht durch die orbitale Variabilität: Derzeit erreicht die Erde den sonnennächsten Punkt ihrer Bahn im Nordwinter, im frühen bis mittleren Holozän war das im Sommer der Fall. Die letzten 2 000 Jahre zeigten eine Abfolge von wärmeren und kühleren Perioden. Grob können vier Perioden unterschieden werden, beginnend mit der relativ stabilen und milden „Römischen Warmzeit“ (von ca. 250 v. Chr. bis 300 n. Chr.). Dieser folgte eine von feucht-kalten Sommern geprägte Periode zu Ende der Römerzeit und während des Frühmittelalters (von ca. 300 bis 840), gefolgt von einer wärmeren und stabilere Periode („Mittelalterliche Warmzeit“, von ca. 840 bis 1260). Zwischen den Jahren 1260 und 1860 war es deutlich kühler. Wegen der generell großen Gletscherausdehnung zu dieser Zeit spricht man von der „Kleinen Eiszeit“. Sowohl mehrere Minima der Sonnenaktivität als auch klimawirksame Vulkanausbrüche fielen in diese Periode. Den deutlichen, instrumentell belegten Temperaturanstieg des 20. Jahrhunderts spiegeln auch die natürlichen Klima-Archive wider.

Österreich verfügt über ein meteorologisches Messnetz, mit dessen Hilfe die langfristige Klimaveränderung im 19. und 20. Jahrhundert gut beschrieben werden kann. Seit 1880 ist die Temperatur um fast 2 °C gestiegen, verglichen mit einer globalen Erhöhung um 0,85 °C. Der erhöhte Anstieg ist auch für die Zeit ab 1980 beobachtbar, in der dem globalen Anstieg von etwa 0,5 °C eine Temperaturzunahme von etwa 1 °C in Österreich gegenübersteht. Der Luftdruck an Tieflandstationen zeigt einen langfristigen Anstieg der allerdings um 1990 von fallendem Luftdruck abgelöst wurde. Der Luftdruck alpiner Höhenstationen wird zusätzlich durch die Temperatur der Luftmassen beeinflusst, die sich unter den Messstationen befinden. Aufgrund der Erwärmung zeigen diese Stationen einen stärkeren positiven Trend und ein Fehlen des Druck-Abfalls seit 1990. Daraus ergibt sich eine unabhängige Bestätigung der Erwärmung, ohne Verwendung von Thermometermessungen. In den letzten 130 Jahren hat die jährliche Sonnenscheindauer an den Bergstationen der Alpen um rund 20 % oder mehr als 300 Stunden zugenommen. Zwischen 1950 und 1980 kam es allerdings durch eine Zunahme der Bewölkung und erhöhte Luftverschmutzung zu einer deutlichen Abnahme der Sonnenscheindauer im Sommer. Die auffallende Ähnlichkeit der Sonnenscheinreihen mit denen der Lufttemperatur und des Luftdrucks legt eine Erklärung des stärkeren regionalen Temperaturanstieges im Vergleich zum globalen Trend nahe. Die Niederschlagsentwicklung in den letzten 150 Jahren zeigt deutliche regionale Unterschiede: In Westösterreich wurde eine Zunahme der Niederschlagsmenge um etwa 10 % bis 15 % registriert, im Südosten hingegen eine Abnahme in ähnlicher Größenordnung.

Von großer Bedeutung – aber statistisch wesentlich schwerer zu erfassen – sind Änderungen der Extremereignisse. Monatliche Daten zeigen, dass die Schwankungsbreite des Klimas in Österreich in den vergangenen beiden Jahrhunderten nicht zugenommen hat. Auch die aktuelle Periode 1981 bis 2010 verlief in dieser Hinsicht unauffällig. Homogenisierte tägliche Temperaturdaten seit 1950 zeigen österreichweit eine Zunahme der heißen Tage und warmen Nächte. Parallel dazu haben kalte Tage und kalte Nächte markant abgenommen. Extremwertindizes, abgeleitet aus homogenisierten Zeitreihen täglicher Niederschlagssummen, zeigen dagegen keine signifikanten und keine einheitlichen Trends. Auch eine langfristige Zunahme der Sturmtätigkeit, abgeleitet aus homogenisierten

täglichen Luftdruckdaten, konnte – trotz einiger herausragender Sturmereignisse in den letzten Jahren – nicht nachgewiesen werden. Über Zu- oder Abnahme kleinräumiger Extremereignisse wie Gewitter, Hagel oder Tornados lassen sich derzeit keine abgesicherten Aussagen machen.

SUMMARY

The climate of the current geological period, the Quaternary, was a sequence of long (cold) glacial and short (warm) interglacial phases, controlled by changes in the parameters of the Earth's orbit (eccentricity of the Earth orbit, tilt and orientation of the Earth axis). Within this framework, we currently live in a warm phase. First recorded in Greenland ice cores, the Dansgaard-Oeschger events (alternations of very cold stadials and – comparatively – mild interstadials) were caused by instabilities of the large Northern Hemispheric ice sheets and their interaction with the deep-water circulation in the North Atlantic. These large-scale and rapid climate swings also had a major influence on the Alpine climate. Near the end of the last glacial („Würm"), starting about 30 000 years ago, glaciers advanced beyond the rim of the Alps and annual temperatures were about 10 °C lower than during the Holocene. About 19 000 years ago, this ice-stream network disintegrated rapidly, and mild interstadial conditions about 14 700 years ago fostered the reforestation of the alpine valleys. The cold reversal of the Younger Dryas (the last cold phase of the Würm glacial) started about 12 900 years ago and ended rapidly (within a few decades) about 11 700 years ago. During the first two thirds of the Holocene (the current interglacial), temperatures were mostly higher than the 20th century average and the Alpine glaciers were smaller than today. From about 7 000 years ago until pre-industrial times, average temperatures decreased by about 2 °C, driven by the orbitally induced decline of the Northern Hemispheric summer insolation: at present the Earth reaches its closest point to the sun (perihelion) during the northern winter, but during the early and mid-Holocene this occurred during the northern summer. The past two millennia have been characterised by a sequence of warmer and cooler periods: the comparatively stable and mild „Roman Warm Period" (about 250 BC until 300 AD) was followed by a time with wet and cold summers, termed „Dark Ages Cold Period" (about 300 to 840 AD). After the warm and stable „Medieval Warm Period" (about 840 until 1260 AD), temperatures dropped markedly. Due to the considerable glacier extent, this period (1260 to 1860 AD) is known as the „Little Ice Age". Low solar activity and major explosive volcanic eruptions contributed to this cooling. The distinct, instrumentally documented temperature increase during the 20th century can also be inferred from climate archives.

A good observational basis in Austria provides a clear picture of climate change during the 19th and 20th centuries. Since 1880, mean temperatures in Austria have increased by almost 2 °C – compared to a global temperature rise of 0.85 °C. This stronger increase also applies to the time since 1980, when global temperatures have risen by about 0.5 °C, while Austrian temperatures rose by about 1 °C. Air pressure at lowland stations showed a gradual increase followed by a decrease since around 1990. Air pressure at high-altitude stations is additionally influenced by the temperature of the air mass underneath. Due to the warming of this air mass, high-altitude stations show a stronger pressure increase until 1990 and no decrease afterwards. This also provides an alternative proof of warming without having to rely on thermometer measurements. During the past 130 years, annual sunshine duration at high-altitude stations has increased by about 20 % (more than 300 hours), but this general increase has been interrupted between 1950 and 1980 due to a high level of cloudiness and air pollution. The increase in sunshine duration has very likely contributed to the stronger temperature rise in Austria compared to the global average. Changes in precipitation during the last 150 years show large regional differences: a 10 to 15 % increase in western Austria is counteracted by a decrease of similar magnitude in southeast Austria.

Changes in climatic extremes are very important – but difficult to capture by statistics. Monthly mean data reveal that the climatic fluctuation range has not increased during the past two centuries. The latest climate period (1981 to 2010) is also inconspicuous in this context. Homogenised daily temperature data since 1950 show a clear increase in hot days and warm nights and a marked decrease of cold days and nights. Climate extreme indices, derived from homogenised time series of daily precipitation sums, on the other hand, generally do not show significant and consistent trends. Storm activity can be inferred from homogenised daily air pressure data: despite some major events during the past few years, there are no signs for a long-term increase. The observational basis for small-scale extreme events like thunderstorms, hailstorms or tornados is not sufficient for the detection of long-term changes.

KERNAUSSAGEN

- In den vergangenen Jahrzehnten wurde eine Reihe von Methoden entwickelt und kontinuierlich verfeinert, die es erlauben, qualitative und in zunehmendem Maß auch

quantitative Aussagen über das Klima vor dem Beginn instrumenteller Messungen zu treffen. Man spricht dabei von „Proxy-Daten".

- Die Klimageschichte der aktuellen geologischen Periode, des Quartärs, war ein Wechselspiel von langen Glazialzeiten („Kaltzeiten") und kurzen Interglazialzeiten („Warmzeiten"), gesteuert durch Schwankungen der Erdbahn-Parameter (Form der Erdbahn, Neigung und Orientierung der Rotationsachse der Erde). Innerhalb dieser Randbedingungen leben wir derzeit in einer Warmzeit innerhalb eines Eiszeitalters.
- Die Glazialzeiten waren durch ein Klima von enormer Variabilität gekennzeichnet, das in keinem Vergleich zu den Klimaschwankungen der Nacheiszeit steht. Die aus den Eisbohrkernen Grönlands bekannten Dansgaard-Oeschger-Ereignisse (Wechsel zwischen sehr kalten Stadialen und – vergleichsweise – milden Interstadialen) hatten ihren Ursprung in den Instabilitäten der großen Eisschilde und deren Interaktion mit der Tiefenwasserströmung im Atlantik. Sie prägten auch im Alpenraum das dominante Klimamuster.
- In den kältesten Phasen der Glaziale (den Stadialen) herrschten auch im Alpenvorland arktische Klima-Bedingungen mit sehr kalten Wintern. Die Erwärmungsphasen (Interstadiale) gingen mit einer sprunghaften Abnahme der Saisonalität (mildere Winter) einher, waren jedoch beginnend vor ca. 75 000 Jahren zu schwach, um eine ausgedehnte Wiederbewaldung in Österreich zu erlauben.
- Gegen Ende des letzten Glazials (Würm) begann vor etwa 30 000 Jahren der jüngste eiszeitliche Gletschervorstoß bis über den Alpenrand hinaus. Verlässliche quantitative Paläoklimadaten dieser Zeit fehlen bislang für die Alpen; man geht jedoch von einer Absenkung der Jahresmitteltemperatur um mindestens 10 °C im Vergleich zum Holozän aus, verbunden mit einer ausgeprägten Abnahme des Niederschlags gegen Osten hin.
- Vor etwa 19 000 Jahren zerfielen die Gletscher im Alpenvorland und in den großen Alpentälern rasch. Vor ca. 16 500 Jahren war der Niederschlag im zentralen Alpenraum aber noch auf etwa die Hälfte bis ein Drittel der heutigen Werte verringert und die Sommertemperatur lag rund 10° unter den heutigen Werten. Die Winter waren sehr kalt und trocken und vergleichbar denen in der heutigen kanadischen Arktis. Vor 14 700 Jahren begann innerhalb weniger Jahrzehnte eine Zeit mit deutlich günstigeren interstadialen Bedingungen, in welche die Wiederausbreitung der Wälder in den nordalpinen Tälern und Vorländern fällt.
- Vor 12 900 Jahren begann der massive Klimarückschlag der Jüngeren Dryas, der letzten großen Kaltphase auf der Nordhalbkugel, die wiederum innerhalb weniger Jahrzehnte vor 11 700 Jahren endete. In den Alpen war sie durch bedeutende Gletschervorstöße in den oberen Talbereichen, eine deutliche Absenkung der Waldgrenze und eine erhöhte geomorphologische Aktivität durch Permafrost in den unvergletscherten Gebieten gekennzeichnet. Die Schneegrenze lag 300 bis 500 m tiefer als während der Mitte des 20. Jahrhunderts, die Untergrenze des Permafrostes lag mindestens 600 m tiefer.
- Die ersten Jahrhunderte des Holozäns (Nacheiszeit) waren noch durch Gletschervorstöße gekennzeichnet, die deutlich weitreichender als am Höhepunkt der „Kleinen Eiszeit" waren und Permafrost konnte bis zu 200 m tiefer als heute existieren. Gegenüber dem 20. Jahrhundert waren die Sommertemperaturen im frühesten Holozän etwa 1,5 bis 2 °C tiefer, während die Niederschlagssummen etwa in der heutigen Größenordnung gewesen sein dürften.
- Dem kühlen Beginn des Holozäns folgte eine deutliche Erwärmung. In den ersten zwei Dritteln des Holozäns die Temperaturwerte meist über dem Mittel des 20. Jahrhunderts. Die Proxy-Daten zeigen als übereinstimmendes Merkmal weiters eine langfristige Temperaturabnahme von etwa 2 °C von den früh- bis mittelholozänen Maxima (bis ca. 7 000 Jahre vor heute) bis in die vorindustrielle Zeit.
- Unbestrittene Ursache für diesen Abkühlungstrend ist die Abnahme der Insolation auf der Nordhemisphäre im Sommer, verursacht durch die orbitale Variabilität: Derzeit erreicht die Erde den sonnennächsten Punkt ihrer Bahn im Nordwinter, während der früh- bis mittelholozänen Maxima war das im Sommer der Fall.
- Demgegenüber zeigt ein anderer, vieldiskutierter Klimaantrieb, die Sonnenaktivität, keinen entsprechend langfristigen Trend. Im mittelfristigen Zeitbereich von mehreren Jahrzehnten bis Jahrhunderten sind Auswirkungen der Sonnenaktivität auf die Temperaturvariabilität hingegen nachgewiesen.
- Die Gletscher waren im Alpenraum während der letzten rund 11 000 Jahre gekennzeichnet durch lang andauernde Perioden mit vergleichsweise geringer Ausdehnung im frühen und mittleren Holozän (bis vor rund 4 000 Jahren), verursacht durch die (orbital gesteuerten) erhöhten Sommertemperaturen. In den folgenden Jahrtausenden kam es zu mehrfachen weitreichenden Vorstößen, die in den großen Gletscherständen der „Kleinen Eiszeit" (von ca. 1260 bis 1860 n. Chr.) kulminierten.

- Die gegenwärtigen Gletscherausdehnungen wurden im Früh- und Mittelholozän mehrfach sowohl unter- als auch überschritten. Allerdings sind die Alpengletscher derzeit nicht im Gleichgewicht mit dem sie steuernden Klima, was sich im aktuell beobachtbaren starken Rückschmelzen manifestiert. Ein direkter Vergleich der gegenwärtigen mit früheren Gletscherausdehnungen im Hinblick auf die klimatischen Randbedingungen ist daher nur begrenzt möglich.
- Die letzten 2000 Jahre zeigten eine Abfolge von warmen und kalten Perioden, die im Schnitt kühler waren als zu Beginn und in der Mitte des Holozäns. Grob können vier Perioden unterschieden werden, beginnend mit der relativ stabilen und milden römischen Warmzeit (von ca. 250 v. Chr. bis 300 n. Chr.). Dieser folgte eine von instabilen, feucht-kalten Sommern geprägte Periode zu Ende der Römerzeit und während des Frühmittelalters (von ca. 300 bis 840). Daran schloss wieder eine wärmere und stabilere Periode an (Mittelalterliche Warmzeit, ab ca. 840 bis 1260). Zwischen 1260 und 1860 wurde es deutlich kühler; nur einzelne Jahrzehnte wiesen etwas höhere Temperaturen auf. Wegen der generell großen Gletscherausdehnung, die für diese Periode nachweisbar ist, spricht man auch von der „Kleinen Eiszeit". Sowohl mehrere Minima der Sonnenaktivität als auch klimawirksame Vulkanausbrüche fielen in diese Periode.
- Den deutlichen, instrumentell belegten Temperaturanstieg des 20. Jahrhunderts spiegeln die natürlichen Klima-Archive ebenfalls wider, auch wenn viele Proxy-Datensätze um das Jahr 2000 enden und daher die aktuelle Klimaentwicklung nicht gänzlich erfassen.
- Österreich verfügt über ein meteorologisches Messnetz, mit dessen Hilfe die langfristige Klimaveränderung im 19. und 20. Jahrhundert gut beschrieben werden kann. Die längste Messreihe, jene von Kremsmünster, geht sogar bis ins Jahr 1767 zurück und ist damit eine der längsten durchgehenden Wetteraufzeichnung in Europa. Eine besondere Erwähnung verdient das hochalpine Sonnblick-Observatorium, dessen Wetteraufzeichnungen bis ins Jahr 1886 zurück reichen. Die Messstelle befindet sich am Gipfel des Hohen Sonnblicks in 3106 m Seehöhe direkt am Alpenhauptkamm.
- Durch Effekte wie die Verschiebung der Beobachtungszeiten, neue Vorschriften für Mittelbildungen, die Einführung von Wetterhütten etc., weisen alle langen Zeitreihen Inhomogenitäten auf, die ohne eine entsprechende Berücksichtigung inkorrekte Trends vortäuschen können. Die längsten Zeitreihen wurden daher mit aufwändigen mathematisch-statistischen Methoden homogenisiert und in der HISTALP Datenbank in monatlicher Auflösung abgespeichert und für die Forschung verfügbar gemacht.
- Die Lufttemperatur (im Jahresmittel) hat seit den 1880er Jahren in zwei Schüben um insgesamt rund 2 °C zugenommen. Bis etwa 1950 gab es einen Anstieg um rund 1 °C, der, wie auch die vorangegangene Abkühlung, überwiegend auf natürliche Klimaantriebe und interne Reaktionen des Klimasystems zurückzuführen ist. Die darauf folgende Phase von rund drei Jahrzehnten mit stagnierenden bis abnehmenden Temperaturen war bereits anthropogen überformt, wobei vermutet werden kann, dass die starke Luftverschmutzung über die insgesamt abkühlende Wirkung der Aerosole („Global Dimming") zunächst noch den Effekt der ebenfalls bereits in Anstieg begriffenen Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) maskiert hat.
- Der endgültige Durchbruch anthropogenen THGs als dominanter Klimaantrieb manifestierte sich in der zweiten Erwärmungsphase des 20. Jahrhunderts, die in den beiden Jahrzehnten von 1980 bis 2000 noch einmal 1 °C betragen hat. Danach stagnierte die Temperatur in Österreich (bei kurzfristiger Betrachtung) auf einem hohen Niveau, das dasjenige der beiden ebenfalls positiven dekadischen Anomalien um 1950 und um 1800 signifikant übertrifft. Die 20-jährig geglätteten Daten zeigen für die Zeit nach 2000 einen deutlich abgeschwächten Anstieg.
- Die Erwärmung in Österreich verlief damit etwa doppelt so stark wie global. Die kurzfristigere Variabilität ist in Österreich stärker ausgeprägt (wie es bei der Betrachtung eines kleinräumigen Gebietes zu erwarten ist). Die saisonale Temperaturentwicklung verlief nicht immer parallel zu der des Jahresmittels, dennoch ist in allen Jahreszeiten eine Erwärmung seit Mitte des 19. Jahrhunderts festzustellen (am geringsten im Herbst).
- Die Temperaturentwicklung in höheren Luftschichten, abgeleitet aus homogenisierten Radiosondenmessungen, ist in 3000 m Höhe dem Verlauf an hochalpinen Stationen sehr ähnlich. Der am Boden festgestellte stärkere Erwärmungstrend im Alpenraum verglichen mit dem globalen Mittel gleicht sich in höheren Schichten den für die mittleren Breiten sonst gefundenen Erwärmungsraten an. In der Stratosphäre ist – so wie auch global – eine deutliche Temperaturabnahme zu beobachten.
- Der Luftdruck an Tieflandstationen zeigt einen sehr langfristigen Anstieg von der Mitte des 19. bis gegen Ende des 20. Jahrhunderts, der allerdings um 1990 von einem ab-

rupten Trendwechsel zu nun wieder fallendem Luftdruck abgelöst wurde. Der Luftdruck alpiner Höhenstationen wird zusätzlich durch die Temperatur der Luftmassen beeinflusst, die sich unter den Messstationen befinden. Aufgrund der Erwärmung zeigen diese Stationen einen stärkeren positiven Trend und eine Fehlen des Druck-Abfalls seit 1990.

- Daraus ergibt sich eine alternative Analysemöglichkeit der Temperaturtrends und eine Bestätigung der Erwärmung, allein aus den Luftdrucktrends der hochalpinen Observatorien im Gegensatz zu denen des Tieflandes, ohne Verwendung von Thermometer-Messungen.
- Die jährliche Sonnenscheindauer hat seit Messbeginn (um 1880) um ca. 20 % zugenommen. Das bedeutet in absoluten Zahlen eine Zunahme um mehr als 300 Sonnenscheinstunden pro Jahr. Die Zunahme war im Sommerhalbjahr stärker ausgeprägt als im Winterhalbjahr. Der sommerliche Anstieg ging in zwei Stufen vor sich, mit einem ersten Maximum um 1950, darauf folgenden sonnenscheinärmeren Jahrzehnten bis etwa 1980 und einem seither anhaltenden massiven zweiten „Regional Brightening", wobei z. B. mehr und längere sommerliche Schönwetter-Phasen zu beobachten sind.
- Die auffallende Ähnlichkeit der Sonnenscheinreihen mit denen der Lufttemperatur und des Luftdrucks legt nahe, dass hier eine Erklärung des stärkeren regionalen Temperaturanstieges im Vergleich zum globalen Trend zu suchen ist.
- Im Gegensatz zur Temperaturentwicklung zeigt die Niederschlagsentwicklung in Österreich deutliche regionale Unterschiede. Seit Mitte des 19. Jahrhunderts ist in den Zeitreihen ein „Alpiner Niederschlagsdipol" erkennbar. Das bedeutet eine langfristige Gegenläufigkeit der Niederschlagsentwicklung im Nordwesten gegenüber dem Südosten des Alpenbogens.
- In Tirol und Vorarlberg hat der Niederschlag in den vergangenen 150 Jahren zugenommen, im Südosten seit dem dortigen Reihenbeginn 1813 abgenommen. Inneralpin und im Norden dominieren dekadische Variationen. Diese besitzen in allen Teilen Österreichs ein dominantes Minimum in den trockenen 1860er Jahren, das nur im Südosten seither wieder erreicht bzw. unterboten wurde und zwar in den trockenen 1940ern und in den anhaltend trockenen Jahrzehnten nach 1970.
- Sehr niederschlagsreiche Jahrzehnte gab es in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts. Diese hohen Niederschläge spielten eine bedeutende Rolle für die starken Gletschervorstöße in dieser Zeit, die zu den beiden Maximalständen der Gletscher um 1820 und in den 1850er Jahren führten.
- Hohe Jahresniederschläge gab es auch in den Jahrzehnten zwischen 1900 und 1940 (Inneralpin und im Südosten beinahe durchgehend, im Westen gedämpft, im Norden gab es eine Unterbrechung durch eine trockene Phase um 1930).
- Nach den im Norden und im Alpeninneren darauf folgenden Negativtrends gab es hier in den 1970er Jahren eine markante Trendwende, die vor allem im Norden und Nordosten Österreichs im ersten Jahrzehnt des 21. Jahrhunderts ein neues Hauptmaximum des Niederschlages erreichen ließ. Im Westen ist das aktuelle Niederschlagsniveau ebenfalls das höchste seit Beginn der Messreihe (1858).
- Im Alpeninneren liegt das aktuelle Niederschlagsniveau im langjährigen Durchschnitt des 20. Jahrhunderts, im Südosten – im Zug des fallenden Jahrhunderttrends – rund 10 % unter diesem.
- Von großer Bedeutung – aber statistisch wesentlich schwerer zu erfassen – sind langfristige Änderungen der Extremereignisse. In Österreich wird die Lage zusätzlich dadurch erschwert, dass die meisten Zeitreihen von Tagesdaten im 2. Weltkrieg verloren gingen.
- Anhand monatlicher Daten kann gezeigt werden, dass die Schwankungsbreite des Klimas in Österreich in den vergangenen beiden Jahrhunderten nicht zugenommen, beim Klimaelement Temperatur sogar abgenommen hat. Auch die aktuelle Periode von 1981 bis 2010 verlief in dieser Hinsicht unauffällig.
- Analysen, die auf homogenisierten täglichen Temperaturextremen seit 1950 beruhen, zeigen österreichweit eine Zunahme der heißen Tage sowie eine Zunahme von warmen Nächten. Parallel dazu haben kalte Tage und kalte Nächte markant abgenommen. Mit dem Anstieg der Temperaturextreme hat sich die nächtliche Abkühlung als auch die Zahl der Frost- und Eistage reduziert.
- Extremwertindizes abgeleitet aus homogenisierten Zeitreihen täglicher Niederschlagssummen, wie Niederschlagsintensitäten oder maximale Tagesniederschlagssummen zeigen dagegen keine signifikanten und keine einheitlichen Trends.
- Auch eine langfristige Zunahme der Sturmtätigkeit, abgeleitet aus homogenisierten täglichen Luftdruckdaten, konnte – trotz einiger herausragender Sturmereignisse in den letzten Jahren – nicht nachgewiesen werden.
- Über Zu- oder Abnahme kleinräumiger Extremereignisse wie Gewitter, Hagel oder Tornados lassen sich derzeit keine abgesicherten Aussagen machen.

- Insbesondere beim Themenkreis Klimawandel und Extremereignisse besteht noch intensiver Forschungsbedarf.

3 Vergangene Klimaänderung in Österreich
3 Past Climate Change in Austria

Kapitel 3 gibt einen groben Überblick über das vorhandene Wissen zur österreichischen Klimageschichte. Zu Beginn werden die in Verwendung stehenden Methoden der Paläoklimatologie aufgeführt. Darauf folgen die Entwicklung der für die Betrachtung der Klimaveränderung relevanten Messnetze und eine Zusammenstellung der gängigsten Methoden zur Auswertung der gemessenen Daten.

Der zweite, längere Teil des Kapitels zeigt die Klimaentwicklung selbst, sowohl für Österreich als auch teilweise für den Alpenraum, auf. Der Teil beginnt mit der Beschreibung des Klimas im Quartär, der geologischen Periode, in der wir uns noch heute befinden (Paläoklima, Abschnitt 3.2.1 bis 3.2.4). Es folgt die Klimabeschreibung mit bereits höherer zeitlicher (monatlicher) Auflösung für die letzten 250 Jahre (Abschnitt 3.2.5). Zeitreihen, gebildet aus Tagesdaten existieren flächendeckend etwa ab 1950. Ihr Mehrwert besteht in der vermehrten Möglichkeit zu Auswertung von Extremwerten, die für Analysen verwendet wurden, die dann in Abschnitt 3.6 angeführt sind. Den Abschluss bildet Abschnitt 3.7 mit einer Zusammenstellung über Variationen und Trends in der freien Atmosphäre.

3.1 Methoden
3.1 Methods

3.1.1 Methoden der Paläoklimatologie

In den vergangenen Jahren und Jahrzehnten wurde eine Reihe von Methoden entwickelt und kontinuierlich verfeinert, die es erlauben, qualitative und in zunehmendem Maß auch quantitative Aussagen über das Klima vor dem Beginn instrumenteller Messungen zu treffen. Ohne diese Ansätze und die damit erstellten sogenannten Proxy-Daten wäre die Datengrundlage der Klimaforschung sehr begrenzt und Aussagen über Klimaänderungen auf Zeitskalen von Jahrhunderten und länger wären nicht möglich. Die Bedeutung der Paläoklimaforschung liegt aber vermehrt auch in einem Beitrag zur Erforschung der Ursachen der mehrjährigen Klimavariabilität, um natürliche von anthropogenen Klimaantrieben zu trennen.

Global gesehen stützt sich die Paläoklimatologie vor allem auf folgende natürliche Klimaarchive: Sedimente am Boden der Tiefsee, Gletschereis in Polarregionen, Sedimente in Seen und Mooren, Ablagerungen von Gletschern, Löss, Sinterbildungen in Höhlen und Jahrringe im Holz. Mit Ausnahme der ersteren beiden spielen alle genannten Archive eine wichtige Rolle in der Erforschung des Klimas der Vorzeit in Österreich; für das letzte Jahrtausend kommen noch historische Dokumente dazu.

Klimarekonstruktion auf Basis von Gletschern

Gletscher sind beliebte Klimazeugen, weil sie schon auf kleine klimatische Änderungen augenfällig reagieren. Dabei werden in erster Linie die Änderungen an der Gletscherzunge betrachtet. Vorstoßende Gletscher, die Moränen aufschieben, Böden und Moore überfahren, Bäume umdrücken oder Höhleneingänge blockieren (Luetscher et al., 2011), weisen auf gletscherfreundliche Bedingungen hin. Rückschmelzende und zerfallende Gletscher, die mitunter organisches Material freigeben, sind ein Zeichen für gletscherungünstiges Klima. Auf diese Weise können Änderungen in der Gletscherausdehnung als qualitative Indikatoren für Klimaverhältnisse dienen und zudem können diese Veränderungen sehr oft absolut datiert werden. Für organische Reste kommt dabei in erster Linie die Radiokarbondatierung und, bei größeren Holzresten, die Dendrochronologie (Datierung auf Basis von Jahrringen) in Frage. Die Stabilisierung älterer Moränen kann, wenn auch mit geringerer Genauigkeit, mit terrestrischen kosmogenen Radionukliden datiert werden. Damit kann eine Chronologie von maximalen Gletscherausdehnungen erstellt werden. In jüngerer Zeit ist es auch zunehmend möglich, Rückzugsphasen und kleinere Vorstöße zeitlich zu erfassen (Nicolussi und Patzelt, 2001; Holzhauser et al., 2005; Joerin et al., 2008).

Neben diesen qualitativen Informationen können Gletscher auch zur quantitativen Klimarekonstruktion herangezogen werden (Kerschner und Ivy-Ochs, 2007). Durch ihren Massenhaushalt sind Gletscher unmittelbar mit ihrer klimatischen Umwelt verbunden. Er wird durch die Akkumulation (Masseneintrag) und die Ablation (Massenverlust) bestimmt. Erstere wird in den Alpen durch den festen Niederschlag (Schneefall, Winddrift) bestimmt, zweitere durch die Energiebilanz während der Ablationsperiode (Hoinkes, 1970). Die Energiebilanz setzt sich aus der kurzwelligen Globalstrahlung und dem Reflexionsvermögen der Gletscheroberfläche (Albedo), der langwelligen Strahlungsbilanz, dem fühlbaren

Wärmestrom als Funktion der Sommertemperatur und dem latenten Wärmestrom als Funktion von Verdunstung oder Kondensation zusammen. Änderungen dieser Klimagrößen steuern die Änderungen des Massenhaushalts und damit die Änderungen in der Gletschergeometrie (Eisdicke, Ausdehnung), der Fließgeschwindigkeit des Eises und entscheiden letztlich über Vorstoß oder Rückschmelzen einer Gletscherzunge. Änderungen des Massenhaushalts sind eng mit den Schwankungen der Höhe der Gleichgewichtslinie verbunden. Sie verbindet alle Punkte auf einer Gletscheroberfläche, an denen die Akkumulation gleich der Ablation ist. Für das langjährige Mittel der Gleichgewichtslinie ist im Deutschen der Begriff „Schneegrenze" üblich (Gross et al., 1977). Sie kann auch für Gletscherstände der Vergangenheit rekonstruiert werden (mit einer Unsicherheit von typischerweise einigen 10 m).

Das Zusammenspiel zwischen Akkumulation und Ablation kann mit der Energie- und Massenbilanzgleichung beschrieben werden; die Perturbationsanalyse dieser Gleichung erlaubt die Modellierung des Einflusses von Klimaänderungen auf die Höhe der Schneegrenze (Kuhn, 1981, 1989; Kaser, 2001). Für viele klimageschichtliche Fragestellungen ist dieser Ansatz aber unnötig komplex. Änderungen in der Energiebilanz können in erster Näherung gut über Änderungen der Sommertemperatur (Ts) beschrieben werden, während Änderungen der Akkumulation über Änderungen des Jahresniederschlags (P) erfasst werden können. Auf diese Weise wurden einige empirische (P, Ts)-Modelle erstellt, die auf einfache Weise das Klima an der Schneegrenze beschreiben (Zusammenstellung in Kerschner, 2005). Diese Modelle können für die Abschätzung der Auswirkung von Klimaschwankungen auf Gletscher herangezogen werden (z. B. Ohmura et al., 1992), sie sind aber nur innerhalb ihrer Randbedingungen gültig. Auf keinen Fall können Änderungen in der Höhe der Schneegrenze einfach in Änderungen der Sommertemperatur umgerechnet werden.

Eine quantitative Interpretation von vergangenen Gletscherschwankungen ist nur für Gletscherausdehnungen möglich, die durch Moränen dokumentiert sind, weil nur dann die Gletscheroberfläche rekonstruiert und die Höhe der damaligen Schneegrenze bestimmt werden kann. Dann bekommt man eine direkte und präzise Klimainformation, die aber nur für einen relativ kurzen Zeitabschnitt, üblicherweise einige Jahrzehnte, gilt. Wenn aus einer externen Quelle, z. B. aus vegetationsgeschichtlichen oder limnologischen Informationen (z. B. Burga und Perret, 1998; Ilyashuk et al., 2009; Lotter et al., 2012), die Sommertemperatur abgeschätzt werden kann, dann eignen sich synchrone Gletschervorstöße für die Abschätzung von Niederschlagsänderungen. Sind hingegen die Niederschlagsverhältnisse bekannt, die z. B. aus einem Gletscherfließmodell hergeleitet werden können, so ist umgekehrt eine Abschätzung der Sommertemperatur möglich (Ivy-Ochs et al., 2006).

Klimarekonstruktion auf Basis von Seesedimenten

Seesedimente sind Ablagerungen, die sich Jahr für Jahr am Seegrund übereinander schichten. Sie bestehen sowohl aus anorganischen als auch aus organischen Stoffen, wobei die Anteilsverhältnisse je nach See stark variieren können. Für eine Untersuchung dieser Ablagerungen werden vom Seegrund mit Hilfe von Rohren und speziellen Bohrgeräten zylindrische Kerne entnommen. Anschließend werden die Sedimentkerne in einzelne Schichten geschnitten. Diese Schichten können mit verschiedenen Methoden datiert werden. Die letzten 150 Jahre werden gammaspektrometrisch mit der ^{210}Pb-Methode datiert, wobei zusätzlich die Einträge durch die Atombombentests (vor allem ^{241}Am, ^{137}Cs) und die Tschernobyl-Katastrophe von 1986 (^{137}Cs) als Marker dienen (Appleby, 2001). Für ältere Ablagerungen verwendet man Altersmodelle der Sedimentation, die mittels Radiokarbondatierung von in den Sedimentproben enthaltenen pflanzlichen Großresten erstellt werden (Björck und Wohlfarth, 2001. In manchen Seesedimenten sind auch jährliche oder saisonale Schichten, die Warven, erkennbar. Das Zählen dieser Schichten ermöglicht oft eine sehr genaue Alterszuordnung. Gelegentlich findet man auch Ablagerungen von Vulkanasche (Tephra), die eine eindeutige zeitliche Zuordnung einzelner Schichten ermöglicht (z. B. Schmidt et al., 2002b).

Aus der Zusammensetzung der Ablagerungen lassen sich vergangene Umweltverhältnisse rekonstruieren. Dabei nützt man einerseits Reste von Organismen, die über Jahrtausende erhalten bleiben, wie Kieselalgenschalen (Diatomeen), Goldalgenzysten (Chrysophyceen), Zuckmücken-Kopfkapseln (Chironomiden) oder Muschelkrebse (Ostrakoden). Da einzelne Arten jeweils wärme- oder kältetoleranter sind, können aus Änderungen der Artzusammensetzung Klimaänderungen berechnet werden (z. B. Wunsam et al., 1995; Lotter et al., 1997; Kamenik und Schmidt, 2005; Heiri et al., 2011). Auch Sauerstoffisotopenverhältnisse der Schalenreste von Muschelkrebsen (Ostrakoden) oder anderen Sedimentbestandteilen lassen Klimarekonstruktionen zu (z. B. Lauterbach et al., 2011). Vegetationsindikatoren wie Pollen sind in Seesedimenten (ebenso wie in Mooren) gespeichert und können zur Rekonstruktion der umliegenden Vegetation und damit auch der entsprechenden ökologischen Bedingungen verwendet werden. Aus der Umgebung gelangen Pollen und pflanzliche Großreste in die Seen. Diese Ablagerungen ermöglichen die Rekonstruktion der um-

liegenden Vegetation und auch der klimatischen Begebenheiten, solange kein menschlicher Einfluss durch Rodung, Ackerbau oder Weidewirtschaft gegeben ist (z. B. Lotter et al. 2000; Kamenik et al. 2009). Zusätzlich können die anorganischen Parameter im Sediment Aufschluss über Klimaänderungen liefern, wie z. B. Änderungen im Niederschlag (z. B. Wilhelm et al., 2012) oder damit verbundene Seespiegelschwankungen (z. B. Magny et al., 2012). Die meisten der hier erwähnten Methoden für Seesedimente werden auch für die Beprobung von Mooren angewandt.

Je nach der Menge an Sediment, die in einem Jahr abgelagert wurde und dem Vorhandensein bzw. Fehlen von Warven sind Klimarekonstruktionen von typischerweise dekadischer bis maximal saisonaler Auflösung möglich. Im Allgemeinen weisen tiefer gelegene Seen mit größeren Einzugsgebieten eine höhere Sedimentationsrate auf als kleine Hochgebirgsseen in den Zentralalpen. Da aber im Alpenraum mit Beginn des Ackerbaus und der Almwirtschaft spätestens ab der Bronzezeit in vielen Seen der Klimaeinfluss durch die erhöhten Nährstoffeinträge überlagert wurde, sind die entlegenen Hochgebirgsseen für die Klimarekonstruktion der letzten Jahrtausende von besonderem Interesse.

Dabei reichen die Ablagerungen meistens bis zum Übergang vom Würm-Glazial zum Holozän zurück, umfassen also die letzten 10 000 bis 12 000 Jahre. Etwas weiter (bis vor etwa 17 / 18 000 Jahren) zurückreichende Zeitreihen sind selten und stammen vor allem aus größeren Voralpenseen (z. B. Huber et al., 2010; Lauterbach et al., 2011; Schmidt et al., 2012). Fortschritte in der Methodik werden in den nächsten Jahren eine höhere zeitliche Auflösung der Rekonstruktionen ermöglichen, vor allem mit Hilfe von Core Scannern (Francus et al., 2009). Organische Spurenstoffe, sogenannte Biomarker, werden derzeit entlang von Umweltgradienten kalibriert (z. B. Pearson et al., 2011) und werden eine zusätzliche Überprüfung bisheriger Klimarekonstruktionen erlauben.

Klimarekonstruktion auf Basis von Höhlensinter

Höhlensinter sind mineralische Ablagerungen in Höhlen, die in den allermeisten Fällen aus Kalzit (Kalziumkarbonat) bestehen und großteils anorganischen Ursprungs sind (Fairchild und Baker, 2012). Ein Synonym für Höhlensinter ist Speläothem. Neben den Tropfsteinen, die an punktuellen Tropfstellen wachsen (vom Boden aufwärts: Stalagmite; von der Decke abwärts: Stalaktite), kennt man noch eine Reihe weiterer Höhlensinter, die sich z. B. auch unter Wasser bilden.

Das zur Bildung von Höhlensinter nötige Sickerwasser stammt vom Niederschlag im hydrologischen Einzugsgebiet des Höhlensystems, nimmt im Boden Kohlendioxid auf, wird dadurch chemisch aggressiv und kann den Gesteinsuntergrund im Falle vom Kalk- oder Dolomitgestein lösen (Verkarstung). Tropft dieses an Karbonat gesättigte Grundwasser in einen Hohlraum, der aufgrund des Luftaustausches mit der freien Atmosphäre einen geringeren Kohlendioxid-Partialdruck aufweist als das Grundwasser, so entgast Kohlendioxid aus diesem Wasser. Dieser Prozess ist vergleichbar dem Zischen beim Öffnen eines kohlensäurehaltigen Dosengetränks (wenn auch wesentlich langsamer und optisch sowie akustisch nicht wahrnehmbar). Infolge dieses Entgasens ändert sich die Thermodynamik des Wassers und das Mineral Kalzit beginnt langsam auszukristallisieren: Es bildet sich Lage für Lage eines Tropfsteins (Frisia und Borsato, 2010).

Die Bedeutung der Höhlensinter für die Klimaforschung eröffnete sich in den letzten zwei Jahrzehnten dank der Fortschritte der geochemischen Analytik. So können nun anhand der Sauerstoffisotope im Kalzit Änderungen des Paläo-Niederschlages bzw. der Paläo-Lufttemperatur bis weit in die Vergangenheit nachgezeichnet werden (Lachniet, 2009). Dabei wird die Häufigkeit des schweren Sauerstoffisotops ^{18}O im Verhältnis zum leichteren ^{16}O als $\delta^{18}O$ Wert ausgedrückt. Die Isotopensignatur des Niederschlages birgt eine Reihe von klimarelevanten Informationen, wovon für Österreich vor allem die Lufttemperatur und die Herkunft der Luftmassen von Bedeutung sind. Wesentlich ist, dass dieses Signal im Zuge der Karstlösung und Wiederausfällung als Kalzit in der Höhle nicht verändert wird, dass also das im Kalzit gemessene Signal unter Berücksichtigung der bekannten Isotopenumverteilung (temperaturabhängige Fraktionierung) direkt dem Wert des Paläo-Niederschlages entspricht. Sauerstoffisotopen stellen auch im polaren Eis einen der wichtigsten Klima-Proxies dar; somit können Klimareihen z. B. aus Grönland direkt mit denen von alpinen Höhlensintern verglichen werden, da beide auf demselben Proxy beruhen.

Die zweite Stärke des Archivs Höhlensinter ist seine sehr gute Datierbarkeit. Spuren von Uran werden im Zuge des schichtenweisen Wachstums eines Tropfsteins in den Kalzit eingebaut und dort beginnt die Uran-Thorium-„Uhr" zu „ticken", d. h. das Isotop ^{230}Th, das seinerseits aus dem Isotop ^{234}U entsteht, zerfällt mit einer Halbwertszeit von ca. 76 000 Jahren. Diese chronologische Methode ist mittlerweile so verfeinert, dass es in den meisten Tropfsteinen möglich ist, das Alter der unterschiedlichen Wachstumslagen innerhalb der letzten ca. 200 000 Jahre auf unter 1 % Genauigkeit zu bestimmen (Spötl und Boch, 2012). Die Datierungsgrenze der Uran-Thorium-Methode liegt je nach Material und Güte des Labors bei 400 000 bis 700 000 Jahre, d. h. der Datierungszeitraum ist

etwa zehnmal so lang wie bei der Radiokarbon-Methode. Letztere kann auch, wird aber nur selten zur Altersbestimmung von Höhlensintern benutzt, da methodische Schwierigkeiten bestehen.

Untersuchungen an österreichischem Probenmaterial (Spötl et al., 2007a, b) wurden hauptsächlich an Stalagmiten durchgeführt, die sich in weltweiten Studien ob ihrer klaren internen Wachstumsstrukturen als am besten für paläoklimatologische Untersuchungen herausgestellt haben. Allerdings sind Stalagmite in alpinen Höhlen eine Seltenheit und der Naturschutz, dem alle Höhlen Österreichs unterliegen, gebietet eine sehr behutsame Beprobungsstrategie. Daneben wurden auch flächige Höhlensinter, sogenannte Wand- und Bodensinter, untersucht. Ihre Beprobung kann mittels Bohrkernen erfolgen und so der Einfluss der Probenahme auf diese Formationen minimal gehalten werden. Entscheidend für die Quantifizierung der gewonnenen Proxy-Werte in Form von Klimaparameter-Zeitreihen ist zudem ein umfassendes Höhlen-Monitoring, um aus dem heutigen Zusammenhang zwischen Niederschlag, Temperatur, Tropfwasser, Höhlenluft und Kalzit robuste Transferfunktionen für Klimaelemente ableiten zu können (z. B. Boch et al., 2011b).

Klimarekonstruktion auf Basis von Jahrringen

Jahrringe sind saisonale Holzzuwachsschichten, die in mehrjährigen Holzpflanzen wie Bäumen während der Vegetationszeit entstehen (Schweingruber, 1983). Jahrringe haben in der Paläoklimatologie zwei wesentliche Aspekte: Einerseits können Jahrringabfolgen zur kalenderjahrgenauen Datierung von Holzmaterial auch Jahrtausende weit in der Vergangenheit zurück verwendet werden, vorausgesetzt die entsprechenden Referenzdatensätze liegen vor. Damit besitzen Jahrringserien ein hohes Potential bezüglich der präzisen Datierung von Ereignissen in verschiedenen Klimaarchiven, etwa zur Rekonstruktion der alpinen Gletscherentwicklung auf der Basis von Holzfunden. Andererseits sind Jahrringe selbst ein wesentliches Klimaarchiv: Die Möglichkeit, verschiedene Jahrringserien von unterschiedlichen, auch weit auseinander liegenden Standorten miteinander zu synchronisieren, beruht auf der Steuerung der Jahrringentwicklung durch die klimatischen Verhältnisse. Je nach ökologischer Standortsituation können unterschiedliche Klimaparameter, z. B. Temperatur oder Niederschlag, die Variabilität der Jahrringe maßgeblich bestimmen. Speziell in Gebirgen kann die in den Jahrringen gespeicherte Klimainformation daher stark variieren. Es können darüber hinaus verschiedene Jahrringparameter, z. B. Gesamtjahrringbreite, maximale Jahrringdichte oder stabile Isotope als Klima-Proxies verwendet werden. Eine Analyse der Variabilität der Jahrringparameter erlaubt in weiterer Folge die quantitative Bestimmung der bestimmenden Klimafaktoren beziehungsweise die Erstellung von Transferfunktionen zur klimatischen Kalibration der Jahrringdaten. Im Hochlagen- und Waldgrenzbereich bestimmen die sommerlichen Temperaturverhältnisse ganz wesentlich die Wachstumsentwicklung. Daher sind mit solchen alpinen Serien mittels Transferfunktionen vergleichsweise genaue Rekonstruktionen der sommerlichen Temperaturschwankungen möglich (Nicolussi, 2009a).

Für Klimarekonstruktionen einsetzbare Jahrringchronologien beruhen auf einer Vielzahl von Einzelserien, die neben exogenen Steuerungsfaktoren auch endogene Wachstumsbedingungen (Alterstrend) widerspiegeln. Letztere müssen für Klimarekonstruktionen eliminiert werden, was mit methodisch verschiedenen Ansätzen, z. B. Alterstrendeliminierung mittels Spline-Funktionen oder Regional Curve Standardisation (RCS) geschehen kann (Briffa et al., 1996). Die jeweils resultierenden Jahrringchronologien geben unterschiedliche Frequenzen der Klimavariabilität wieder. Beispielsweise ist die Rekonstruktionsmöglichkeit der Klimavariabilität mit spline-standardisierten Jahrringdaten prinzipiell durch die Länge der eingehenden Einzelserien (Cook et al., 1995) und damit in der Regel auf den mehrdekadischen Bereich beschränkt. Demgegenüber wird mit RCS-standardisierten Jahrringchronologien die Erfassung der langfristigen, d. h. der mehrhundert- bis mehrtausendjährigen Klimavariabilität angestrebt (z. B. Helama et al., 2005; Büntgen et al., 2011).

Für die Gebiete nördlich der Alpen existiert mit der Süddeutschen Eichenchronologie eine über mehrere Jahrzehnte entwickelte, die letzten gut 10 000 Jahre abdeckende Jahrringbreitenchronologie, die ihren Einsatzbereich vor allem für Datierung aber auch für die Kalibrierung der Radiokarbonmethode hat (Becker, 1993; Spurk et al., 1998). In den Alpen existieren für das vergangene Jahrtausend vergleichsweise viele Jahrringchronologien, sowohl für Jahrringbreite als auch maximale Jahrringdichte, die auch für Klimarekonstruktionen Verwendung fanden (z. B. Büntgen et al., 2006; Trachsel et al., 2012). Eine nahezu das gesamte Holozän abdeckende alpine Jahrringbreitenchronologie konnte hingegen erst kürzlich erstellt werden. Die Ostalpine Nadelholz-Chronologie („Eastern Alpine Conifer Chronology“, EACC) basiert auf Hölzern aus dem zentralalpinen Hochlagenbereich (von ca. 2 000 bis 2 400 m Seehöhe) vor allem des mittleren Ostalpenraums (Nicolussi et al., 2009). Der Datensatz wurde bisher vor allem für Datierungszwecke in verschiedenen Klimaarchiven eingesetzt (Holzhauser et al., 2005; Nicolussi et al., 2005; Joerin et al., 2008), diente aber auch einer 2 500 Jahre zurückreichenden

Rekonstruktion der Sommertemperaturentwicklung (Büntgen et al., 2011).

Klimarekonstruktion auf Basis von Dokumenten

Ab dem Mittelalter sind für die Analyse und Rekonstruktion der Klimaentwicklung auch historische, also von Menschen erstellte, Dokumente auswertbar, die auf direkten Beobachtungen von Witterungssituationen oder Ereignissen mit klimatischem Hintergrund beruhen (Brázdil et al., 2005). Der Begriff „Dokumente" umfasst dabei ein weites Spektrum von Quellen, angefangen bei Chroniken mit Witterungserwähnungen, gedruckten Büchern, Bildern, Aufzeichnungen zu Weinerntedaten und ähnlichen Beobachtungen zur Vegetation, Hochflutmarken an Gebäuden etc. Es werden mit diesen qualitativen und oftmals nur sporadischen Archiven auch häufig Extremereignisse erfasst.

Dokumente als Klimaarchiv sind durch die hohe zeitliche Auflösung der Beobachtungen, z. B. extreme Niederschlagsereignisse und auch durch die Abdeckung des Gesamtjahres gekennzeichnet. Kein anderes Klimaarchiv kann Angaben zu allen Jahreszeiten erbringen; andere, natürliche Proxies verwendende Klimaarchive sind meistens auf eine Jahreszeit beschränkt. Darüber hinaus lassen Dokumente die Analyse von Extremereignissen, etwa die Entwicklung der Hochwasserhäufigkeit, zu. Die Repräsentanz vieler Regionen im Datensatz bewirkt weiters eine hohe räumliche Abdeckung der Rekonstruktionen.

Die Herausforderungen dieses Klimaarchives liegen in der Vielzahl der zu bearbeitenden Quellen, der Umsetzung der von zeitgenössischen BeobachterInnen jeweils subjektiv dokumentierten Ereignisse in quantitative Zeitreihen einzelner Klimaelemente wie Temperatur oder Niederschlag und der Erfassung langfristiger (d. h. mehrdekadischer und längerer) Klimaentwicklungen.

Auf historischen Dokumenten beruhende, quantitative Klimazeitreihen liegen für Mitteleuropa – regional gestreut – ab etwa 1500 n. Chr. vor (Pfister, 1999; Luterbacher et al., 2004; Dobrovolný et al., 2010). Bis zum Jahr 1000 n. Chr. zurück nimmt zwar die Zahl der Datensätze ab, die Erstellung durchgehender Rekonstruktionen ist jedoch trotzdem möglich (z. B. Glaser und Riemann, 2009). Für Österreich liegen im Vergleich zu manchen Nachbarländern (Schweiz, Tschechien) bisher vergleichsweise wenige Studien mit diesem paläoklimatologischen Ansatz vor (z. B. Rohr, 2006a, b; Maurer et al., 2009), obwohl die Ausgangslage, d. h. der Reichtum an historischen Quellen, in ähnlicher Weise gegeben wäre.

3.1.2 Instrumentelle Messungen und deren Verwertung in der Klimaforschung

Im folgenden Abschnitt liegt das Hauptaugenmerk auf der Beschreibung von Messnetzen, die aufgrund ihrer Kontinuität für die österreichweite Untersuchung von langfristigen Klimaveränderungen geeignet sind, bzw. aufgrund ihrer Auslegung bei kontinuierlicher Fortführung großes Zukunftspotential für die Klima- und Klimafolgenforschung aufweisen. Darüber hinaus gibt es in Österreich aber noch weitere Messnetze, die insbesondere für regionale und lokale Untersuchungen wertvolle Beträge liefern, z. B. die Messnetze der Bundesländer, der Lawinenwarndienste und von Kraftwerksgesellschaften. Es würde aber den Rahmen dieser Zusammenstellung sprengen, genauer auf sie einzugehen.

Messnetz der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG)

Meteorologische Messdaten ermöglichen uns das vergangene Klima detailliert zu studieren und zu analysieren. Die ersten brauchbaren meteorologischen Messungen aus Österreich stammen von der Station Kremsmünster in Oberösterreich und reichen bis in das Jahr 1767 zurück. Neben Kremsmünster können noch Daten weiterer Stationen für Klimaanalysen des 18. Jahrhunderts herangezogen werden: In Wien jene der alten Universitätssternwarte sowie jene der Universität Innsbruck, daneben einige Stationen aus der „Greater Alpine Region" (Basel, Bern, Genf in der Schweiz; Hohenpeißenberg, Karlsruhe, München, Regensburg, Stuttgart in der Bundesrepublik Deutschland; Budapest in Ungarn; Milano, Padova, Torino und Verona in Italien). Im Laufe des 19. Jahrhunderts stieg die Zahl der Beobachtungsstationen kontinuierlich an. 1851 kam es zur offiziellen Gründung des österreichischen Wetterdienstes (K.K. Central-Anstalt für Meteorologie und Erdmagnetismus), auf dem heutigen österreichischen Territorium gab es damals bereits 20 meteorologische Beobachtungsstationen (Auer et al., 2001b). Die Zahl der Beobachtungsstationen stieg im Laufe der Zeit noch weiter an. Rückschläge brachten der Erste, aber vor allem der Zweite Weltkrieg. Es mussten nicht nur sehr viele Stationen ihren Betrieb einstellen, aus dem Blickwinkel der Archivierung ereignete sich noch Schlimmeres: Beinahe der gesamte Bestand des Datenarchivs der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik musste dem Reichswetterdienst übergeben werden, wo er 1944 vollständig verbrannte. Nach Ende des zweiten Weltkrieges konnte das Stationsnetz relativ rasch wieder aufgebaut werden. Das derzeitige Messnetz

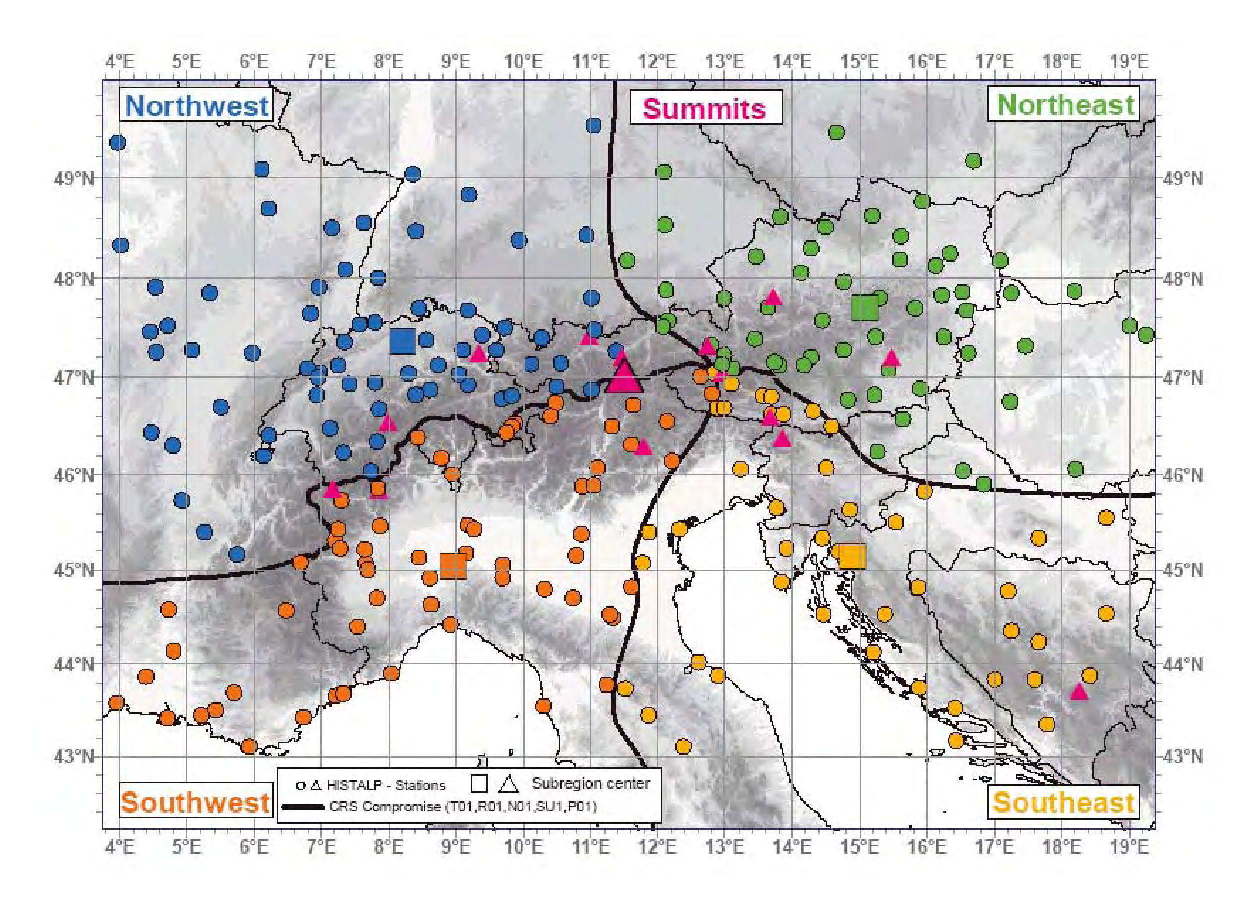


Abbildung 3.1 Das HISTALP-Netzwerk von ca. 200 Standorten und mehr als 500 einzelnen Klimazeitreihen (Stand: 2009). Bergstationen sind als Dreiecke gekennzeichnet. Zusätzlich ist die objektiv analysierte Regionalisierung nach Auer et al. (2007) durch Klima-Grenzlinien eingezeichnet

Figure 3.1 HISTALP Network of 200 stations with more than 500 single climatological time series (status 2009). Mountain stations are marked as triangles. Bold black lines separate regions with common climate variation after Auer et al. (2007)

umfasst etwa 200 Stationen, die noch durch fremdfinanzierte Stationen ergänzt werden, wie etwa die Ö3 Stationen, Kurortstationen oder Stationen der Flugsicherung, sodass das österreichische Bundesgebiet insgesamt durch ca. 250 Wetterstationen abgedeckt ist. Das Messprogramm umfasst Luftdruck, Temperatur, Sonnenschein, Luftfeuchtigkeit, Niederschlag und Schnee, Wind und Strahlung. Bewölkung und spezielle atmosphärische Erscheinungen wie etwa Gewitter werden nach wie vor „subjektiv" von geschulten BeobachterInnen erfasst. Eine besondere Rolle in einem Alpenland spielen Bergstationen, deren Tradition bis in die Mitte des 19. Jahrhunderts zurückreicht. Die höchstgelegene Station Österreichs der Brunnenkogel in Tirol (3 440 m Seehöhe) hat am 1. Juli 2003 ihren Betrieb aufgenommen. Für Analysen der dekadischen Variabilität und Langfristtrends im Hochgebirge eignen sich in erster Linie der Sonnblick in 3 106 m Seehöhe (ab 1887) und die Villacher Alpe (2 160 m) mit Messungen seit 1921, die kombiniert mit dem Hochobir (2 040 m, Messungen zwischen 1851 und 1944) überhaupt die längste Bergreihe Österreichs ergibt (Böhm, 2004).

Zur Beantwortung von Fragen zur Klimaänderung eigenen sich jene Messstationen, aus denen ausreichend lange Zeitreihen gebildet werden können und die den Homogenitätskriterien entsprechen. Dazu wurde an der ZAMG die HISTALP Datenbank für die Greater Alpine Region (GAR) aufgebaut, die 2009 ans Netz ging (http://www.zamg.ac.at/histalp) und nun allgemein zugänglich ist. Die Idee einer grenzübergreifenden Datensammlung von instrumentellen Langzeitklimadaten für den Alpenraum und seiner weiteren Umgebung entstand in den frühen 1990ern (Böhm, 1992; Auer, 1993; Auer und Böhm, 1994). Viel Arbeit wurde in die Homogenisierung (vgl. Abschnitt 3.1.3) der Reihen investiert. Dafür wurden Programme entwickelt, die später zum ZAMG-System HOCLIS weiterentwickelt werden sollten (Peterson et al., 1998; Auer et al., 1999). Durch mehrere nationale und internationale Forschungsprojekte wie ALOCLIM - BMWF-GZ. 308.938/3-IV/B3/96 (Auer et al., 2001a und b) und ALPCLIM – EU-FP4 ENV4-CT97- 0639 (Auer et al., 2001c) und CLIVALP („Climate Variability Studies in the

Alpine Region", FWF P 15076-N06[1]) wurde eine systematische Datenbankstruktur erarbeitet, die Zahl der Elemente erweitert sowie die Anzahl der homogenisierten Reihen vergrößert. Ausführlich beschrieben wird der Datensatz in Auer et al. (2007). Derzeit erlaubt HISTALP das Downloaden von Lufttemperatur, Sonnenscheindauer, Luftdruck und Niederschlag in monatlicher Auflösung, CRSMs („Coarse Resolution Subregional Means") von Lufttemperatur, Sonnenscheindauer, Bewölkung und Niederschlag (relativ zu 1961 bis 1990 und relativ zu 1901 bis 2000), Griddaten in 1°-Auflösung für Luftdruck, Lufttemperatur und Niederschlag (Relativdaten) sowie absolute Griddaten im 5-Minuten Abstand für Lufttemperatur (Chimani et al., 2012), Gesamtniederschlag (Efthymiadis et al., 2006) und fester Niederschlag (auch in Prozenten des Gesamtniederschlages) (Chimani et al., 2011).

Homogenisierte Tagesdaten liegen derzeit nur für Temperaturextreme und Niederschlagsmengen vor. Der Datensatz[2], der 2010 aufbereitet wurde (Nemec et al., 2012), umfasst 71 Klimastationen und deckt die Periode 1948 bis 2009 ab. Im Projektendbericht sind die verfügbaren Stationen mit der Anzahl der durchgeführten Homogenisierungen aufgelistet.[3]

Für sechs Standorte stehen aufbereitete Temperaturreihen auf Tagesbasis zur Verfügung, die bis ins 19. Jahrhundert zurückreichen (qualitätsgeprüft, aber nur teilweise homogenisiert).

Monitoring Sonnen- und Wärmestrahlung

Mitte 2010 wurden an der ZAMG neue Projektinitiativen zum Thema Sonnen- und Wärmestrahlung gestartet[4], die sowohl ein Klimamonitoring nach dem Stand der Technik ermöglichen und die Qualität des bestehenden Routinemessnetzes verbessern, als auch wichtige Grundlagendaten für die Klimaforschung und die Allgemeinheit liefern (Olefs et al., 2011; Olefs and Schöner, 2012). An fünf ausgewählten Standorten (Wien Hohe Warte, Sonnblick, Innsbruck, Graz, Kanzelhöhe) wurde im Rahmen des ARAD Projektes ein Langzeitmonitoring der Sonnen- und Wärmestrahlung mittels Suntracking-Systemen und einem sehr hohen, international einheitlichen Qualitätsstandard initiiert (BSRN – Baseline Surface Radiation Network). Neben der Direkt-, Diffus- und Globalstrahlung wird auch die langwellige Strahlung der Atmosphäre mit einer zeitlichen Auflösung von einer Minute gemessen. Verbesserte tägliche Datenqualitätskontrollen der Sonnenscheindauer, Globalstrahlung und Himmelsstrahlung an den österreichweit 250 TAWES-Stationen (ZAMG Routinemessnetz) wurden ebenfalls eingeführt und haben die Qualität des Basismessnetzes erneut gesteigert. Die Erstellung eines Globalstrahlungsmodelles auf einem 1×1 km^2 Gitter und die Kopplung an das INCA Nowcasting-System der ZAMG ermöglicht die Analyse der Direkt-, Diffus- und Globalstrahlung auf beliebig geneigte Flächen für ganz Österreich in naher Echtzeit und in Zukunft auch im Bereich der Kurz- und Mittelfristprognose. Erst vor kurzem wurde mittels dieses Modelles ein stündlicher Datensatz der Globalstrahlung auf die horizontale und reale Fläche in 100×100 m^2 Auflösung für ganz Österreich in der Periode 1980 bis 2010 berechnet (Pasztor et al., 2014).

Aerologische Messungen Wien Hohe Warte

Seit Anfang der 1950er Jahre werden auf der Hohen Warte aerologische Messungen mit Wetterballonen durchgeführt. Ab 1957 werden die Starts der Radiosonde einheitlich um 0 und 12 Uhr UTC durchgeführt. Gemessen werden Temperatur, Luftfeuchte, Luftdruck, Windgeschwindigkeit und Windrichtung. Um 6 und 18 Uhr UTC werden Ballonaufstiege ohne Sonde durchgeführt. Dabei werden mittels Radar nur die Windgeschwindigkeit und die Windrichtung erfasst.

Die Daten der Hauptdruckflächen sind seit 1952 in der Datenbank der ZAMG verfügbar, ab 1964 gibt es dort auch die sogenannten „Markanten Punkte". Die Daten der Windaufstiege sind leider erst ab 1996 digital erfasst worden. Ab 2002 gibt es auch zeitlich hoch aufgelöste Messungen (alle ein oder zwei Sekunden), diese Daten liegen als ASCII-Files vor. Variabilität und Trends in der freien Atmosphäre werden im Abschnitt 3.2.7 besprochen.

Das phänologische Messnetz

In Österreich betreibt die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik seit 1852, also bereits ein Jahr nach ihrer Gründung, ein phänologisches Beobachtungsnetz, das von Carl Fritsch, Vizedirektor der k.k. Central-Anstalt für Meteorologie und Erdmagnetismus aufgebaut wurde. Er verfasste eine „Instruction für Vegetationsbeobachtungen" (Fritsch, 1850, 1854, 1858, 1863), um Beobachtungen an Pflanzen untereinander vergleichbar und damit einer wissenschaftlichen Bearbeitung zugänglich zu machen. Dieses Netz fand mit dem Tod von Fritsch (26.12.1879) sein Ende. Erst ab 1928 organisiert und

[1] http://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klimaforschung/zeitliche-klimaanalyse/clivalp

[2] http://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klimaforschung/datensaetze/hom-start

[3] http://www.zamg.ac.at/cms/de/dokumente/klima/dok_projekte/homstart/homstart-endbericht

[4] http://www.zamg.ac.at/strahlung

betreut die ZAMG das österreichische phänologische Netz, mit einer Unterbrechung von 1938 bis 1945.

Das Programm umfasst Beobachtungen an heimischen oder weit verbreiteten Pflanzen, landwirtschaftlichen Nutzpflanzen, Obst und an einigen wenigen Tieren. Die phänologische Beobachtung läuft nach dem Prinzip der „wissenschaftlichen Bürgerbeteiligung“ ab. BeobachterInnen, sogenannte Citizen Scientists notieren / melden den Eintritt von bestimmten Entwicklungsstadien der Pflanzen wie Blühbeginn, Blattentfaltung, Reifebeginn, Laubverfärbung bzw. von z. B. Eintreffen von Zugvögeln und seit 2006 können sie ihre Daten Online direkt via <www.zamg.ac.at/phaenologie> auf die Phänologie-Datenbank der ZAMG hochladen. Der „klassische“ Übertragungsweg einmal jährlich per Post existiert daneben natürlich weiterhin.

Die Zahl der Beobachtungsstandorte betrug 2012 etwa 120, allerdings ist in Abhängigkeit von den beobachteten Pflanzen-Entwicklungsstadien eine große Fluktuation anzutreffen. Herbstphasen finden generell weniger Beachtung als Frühlingsphasen.

Es werden zwar erst seit dem Jahr 1987 alle neu einlangenden phänologischen Daten digitalisiert, aber dank Unterstützung des Bundesministeriums für Wissenschaft und Forschung werden seit einigen Jahren auch die Daten vor 1987 in die phänologische ZAMG Datenbank integriert.

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Biosphäre werden ausführlich in Band 2, Kapitel 3 beschrieben.

Totalisatoren und Schneepegel Sondermessnetz Sonnblick

Seit 1927 wird rund um den Sonnblick ein Sondermessnetz von Totalisatoren (Niederschlagsmessgeräte) und Schneepegeln betrieben (Auer et al., 1998): Schneepegel auf den Gletschern, Totalisatoren nahe den Gletscherrändern. Die Ablesung der Geräte erfolgt monatlich, die Datenpublikation der Totalisatoren erfolgt regelmäßig in den Jahresberichten des Sonnblick Vereines und im Jahrbuch der ZAMG[5]. Historische Totalisatorenwerte findet man in Roller, 1961; Lauscher, 1961; Auer, 1992.

[5] http://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klimauebersichten/jahrbuch

Messnetz der Hydrographischen Dienste in Österreich

Seit mehr als hundert Jahren beobachtet der Hydrographische Dienst die Komponenten des Wasserkreislaufes in Österreich, sowie die damit zusammenhängenden Erscheinungen in ihrer räumlichen und zeitlichen Abfolge. Im Anhang ist diesbezüglich eine Übersichtstabelle über Niederschlag (atmosphärischer Bereich), Oberflächengewässer und Grundwasser zu finden, welche Informationen zu den beobachteten Parametern, ihrer zeitlichen Auflösung und über den Beginn der analogen Datenerfassung beinhaltet sowie einen Hinweis falls für den Parameter Daten im Internet zum Download verfügbar sind.

Niederschlag

Die Erfassung des Niederschlags erfolgt mit Totalisatoren, Ombrometern oder Ombrografen. Von den 1 060 im Jahr 2009 bestehenden Niederschlagsmessstellen der Hydrographischen Dienstes waren 156 mit Totalisatoren, 574 mit Ombrometern und 487 mit Ombrografen ausgerüstet. Zusätzlich zur Niederschlagserfassung wird an ca. 830 der bestehenden Messstellen die Schneehöhe bzw. die Neuschneehöhe gemessen, an 695 die Lufttemperatur beobachtet und an 38 die Verdunstung ermittelt. Der Niederschlag zeigt eine hohe räumliche und zeitliche Variabilität. So können konvektive Niederschlagsereignisse eine Ausdehnung von einigen hundert Metern und eine Dauer von einigen Minuten besitzen und im Vergleich dazu frontale Niederschläge einige hundert Kilometer überdecken und einige Stunden dauern. Durch die starke orographische Gliederung Österreichs wird die räumliche Variabilität noch verstärkt. Daher ist eine hohe Messstellendichte erforderlich um auch in orographisch gegliederten Bereichen (alpiner Bereich) möglichst flächendeckende Aussagen über das Niederschlagsverhalten treffen zu können.

Schnee

Die Schneebeobachtung beim Hydrographischen Dienst umfasst immer die Messung der Höhe der Schneedecke und des Neuschnees – dabei wird zusätzlich auch die tägliche Niederschlagssumme mit einem Ombrometer ermittelt. An einigen Messstellen erfolgt auch die Bestimmung des Wasseräquivalents der Schneedecke.

Oberflächengewässer

Die systematische Einrichtung eines staatlichen Messnetzes an Oberflächengewässern begann in Österreich mit dem Jahr 1893. Ab dem Jahr 1951 bis in die Mitte der 1990er Jahre wurden die Messstellen mit Lattenpegelablesungen durch kontinuierlich registrierende Wasserstandsmessstellen ersetzt. Im Jahr 2009 umfasst das Messnetz an Oberflächengewässern ca. 720 kontinuierlich registrierenden Wasserstandspegel, 575 Durchflussmessstellen und ca. 260 Messstellen, an denen die Wassertemperatur gemessen wird. Die Messnetzdichte in den einzelnen Flussgebieten ist aufgrund der Gewässerdichte sehr unterschiedlich. Im Bundesgebiet kommt eine Wasserstandsmessstelle auf ca. 100 km^2, wobei dieser Wert im oberösterreichischen Inn- und Salzachgebiet mit einer Messstelle auf 50 km^2 stark überschritten und im Marchgebiet mit einer auf 350 km^2 stark unterschritten wird. Nahezu die Hälfte aller Messstellen erfassen Durchflüsse aus Einzugsgebieten von 100 bis 250 km^2 und ca. 10 % beschreiben Einzugsgebiete bis 25 km^2. Ein wesentlicher Faktor bei der Anwendung hydrologischer Statistik ist die Anzahl der Beobachtungsjahre. Mit Stand 2009 gibt es für ca. 40 % der Messstellen Durchflussangaben aus 10 bis 30 Jahren. Mehr als 100 Jahre Beobachtungszeit liegen lediglich für die Donaupegel in Wien vor.

Seit 2006 wird an 26 Messstellen die Schwebstoffkonzentration kontinuierlich gemessen. Die Tagesmittelwerte der Schwebstofffracht werden ausgewertet und sowohl im Hydrographischen Jahrbuch Österreichs, als auch im Internet veröffentlicht.

Grundwasser

Als Beginn der Einrichtung und des Betriebes eines österreichweiten Grundnetzes für die Beobachtung des Grundwasserhaushaltes in Österreich durch den Hydrographischen Dienst wird das Jahr 1955 angegeben. In einzelnen Gebieten liegen aber bereits systematische Beobachtungen seit 1930 vor. Im Jahr 2009 wurde an 3 285 Messstellen der Grundwasserstand an Peilrohren (ca. 60 %) und Brunnen (ca. 40 %) gemessen. Im Jahr 1995 begann der Aufbau eines Quellmessnetzes, in Österreich. 2009 existierten 76 Quellmessstellen an denen Schüttung, Wassertemperatur, Leitfähigkeit und in den meisten Fällen auch Trübung registriert werden.

Eine Tabelle mit Informationen zu den beobachteten Parametern, ihrer zeitlichen Auflösung, den Beginn der analogen Datenerfassung und Hinweise auf Downloadmöglichkeiten findet sich im Anhang. Auswirkungen des Klimawandels auf die Hydrosphäre werden in Band 2, Kapitel 2 beschrieben.

WegenerNet Klimastationsnetz Region Feldbach

Die Region Feldbach in der Südoststeiermark ist durch eine ausgeprägte, wissenschaftlich und praktisch interessante Variabilität von Wetter- und Klimavorgängen, sowie durch starke rezente Klimatrends geprägt (Wakonigg, 1978; Auer et al., 2007; Prettenthaler und Dalla-Via, 2007; Wakonigg und Podesser, 2010; Kabas et al., 2011a; Kabas, 2012). Dementsprechend wurde sie vom Wegener Zentrum für Klima und Globalen Wandel der Universität Graz (Kirchengast et al., 2011) als Fokusregion für ein Pionierexperiment zur Wetter- und Klimabeobachtung mit sehr hoher Auflösung ausgewählt: Das WegenerNet Klimastationsnetz Region Feldbach (kurz WegenerNet) umfasst 151 meteorologische Stationen, die Temperatur, Feuchte, Niederschlag und andere Parameter mit hoher Genauigkeit in neuartiger räumlicher und zeitlicher Dichte messen (eine Station etwa je 2 km^2 und Messwerte alle 5 Minuten; ca. $1{,}4 \times 1{,}4$ km^2 Stationsgitter in einem Gebiet von ca. 20×15 km^2 um die Stadt Feldbach, 46.93 °N / 15.90 °E; Kirchengast et al., 2008; Kabas und Kirchengast, 2009; Kirchengast et al., 2013).

Seit Jänner 2007 liefert das WegenerNet flächendeckend Daten zur kleinregionalen Wetter- und Klimaentwicklung, nach einer Pilot- und Demonstrationsphase von 2007 bis 2010 seit 2011 in operationeller Form. Ein automatisiertes, kontinuierlich betreutes und weiterentwickeltes Prozessierungssystem stellt qualitätskontrollierte Stationsdaten und daraus abgeleitete regelmäßige Gitterdaten (200×200 m^2 Gitter) in verschiedener zeitlicher Auflösung von 5-Minuten-Basisdaten bis zu Jahresdaten am WegenerNet Datenportal für Visualisierung und Download in Nahezu-Echtzeit bereit (Datenlatenz kleiner als 1–2 Stunden; Kabas et al., 2011b; Kabas, 2012).

Das WegenerNet[6] ist als Langzeit-Feldexperiment angelegt, mit dem übergeordneten Ziel als hochauflösendes Monitoring- und Validierungsgebiet für Wetter- und Klimaforschung und Anwendungen zu dienen. Nutzungen der Daten beinhalten die Validierung und Eichung von nicht-hydrostatischen Klimamodellen und statistischen Skalierungsmethoden auf 1–10 km Auflösung sowie von Wetterradarmessungen und Erdbeobachtungsdaten von Satelliten, insbesondere bezüglich Niederschlag und weiterer hydrologischer Größen, die Untersuchung von geländeklimatologischen Effekten, Studien zum Wasserhaushalt und viele weitere mehr (Wallner, 2008; Oberth, 2010; Reszler et al., 2011; Prein et al., 2011; Kann et al., 2011; Kabas, 2012). Eine detaillierte Gesamtbeschreibung des Netzes und seiner Nutzung wird von Kabas

[6] http://www.wegenernet.org

(2012) gegeben, eine konzise Beschreibung von Kirchengast et al. (2013).

Das WegenerNet integriert ab 2012 als komplementäres alpines Kleinmessnetz auch die hydrometeorologischen Stationen der Forschungsplattform Johnsbachtal / Gesäuse in der Obersteiermark. Es ist überdies in einer Reihe von Messnetz-Kooperationen eingebunden, wie beispielsweise beim Netzwerk LTER („Long-Term Ecosystem Research Network"; Mirtl et al., 2012), beim Blitzmessnetz LiNet („Lightning Detection Network") (Betz et al., 2009) oder ab 2012 beim ISMN (International Soil Moisture Network; Dorigo et al., 2011), um eine möglichst breite Verfügbarkeit und Nutzung zu fördern.

ALDIS Blitzortung

Das österreichische Blitzortungssystem ALDIS („Austrian Lightning Detection & Information System" – siehe www.aldis.at) wurde im Jahr 1991 / 92 als Kooperationsprojekt von VERBUND (heute APG) und dem Österreichischen Verband für Elektrotechnik (OVE) aufgebaut. ALDIS ist ein sogenanntes „Low-Frequency" (LF) System, das die elektromagnetischen Feldsignale von Blitzen in einem Frequenzbereich von 10–350 kHz auswertet. LF Systeme sind optimal zur genauen Ortung von Wolke-Erde Blitzen. Seit dem Jahr 2000 ist ALDIS integriert in das gesamteuropäische Netzwerk EUCLID („European Cooperation for Lightning Detection"), dem Zusammenschluss mehrerer nationaler Netzwerke zu einem länderübergreifenden System mit ca. 130 Ortungssensoren. Durch die Einbindung von Sensoren in den umliegenden Ländern ist eine gleichmäßige Ortungsqualität über das gesamte Bundesgebiet gewährleistet, die vor dem Zusammenschluss im Westen Österreichs aufgrund der geographischen Gegebenheiten nicht realisierbar war.

Seit Anfang der 1990er Jahre, dem weltweiten Beginn des großflächigen Einsatzes der Blitzortung, gab und gibt es immer noch technologische Verbesserungen sowohl bei den verfügbaren Sensoren als auch bei den eingesetzten Auswertealgorithmen. Diese Verbesserungen sowie der Zusammenschluss mit den Nachbarländern führten zu einer entsprechend verbesserten Datenqualität. Eine Zusammenfassung der wesentlichen Entwicklungsstufen von ALDIS während der ersten 10 Betriebsjahre von 1992 bis 2001 findet man in Schulz et al. (2005).

Derzeit sind bei ALDIS acht LS7000 Sensoren der Firma VAISALA im Einsatz, die dem aktuellen Stand der Technologie entsprechen und in den Jahren 2005 / 2006 installiert wurden. Mit diesem Sensortyp ist es auch möglich, einen Teil der Wolke-Wolke Blitze zu detektieren.

Verschiedene Auswertungen von Blitzentladungen in den Sender Gaisberg bei Salzburg – dort betreibt ALDIS seit 1998 eine Blitzforschungsstation – bzw. von Blitzen, die auf Basis von Videoaufzeichnungen und elektrischen Feldmessungen eindeutig als Wolke-Erde Blitze verifiziert werden konnten, haben für ALDIS eine aktuelle „Detection Efficiency" von 98 % und einen Medianwert von 124 m für die Ortungsgenauigkeit geliefert.

Mit der ALDIS Blitzdatenbank ist es möglich, die Anzahl der Wolke-Erde Blitzschläge innerhalb gegebener geographischer Grenzen zu zählen. Die Anzahl der in Österreich georteten Blitze variierte in den vergangenen Jahren grob zwischen 100 000 und 280 000. Das seit dem Start von ALDIS blitzaktivste Jahr war das Jahr 2006. Eine Gegenüberstellung der Anzahl der georteten Blitze in den einzelnen Jahren bis zum jeweils aktuellen Datum ab 1992 ist online auf der ALDIS-Homepage verfügbar.

Messungen der Luftgüte und Treibhausgasentwicklung

Kontinuierliche Messungen von Luftschadstoffen und Treibhausgasen (THG) werden vom Umweltbundesamt durchgeführt[7]. Exemplarisch sind hier die THG-Messungen am Sonnblick Observatorium genauer beschrieben. Die Messstelle befindet sich am Gipfel des Hohen Sonnblick in 3 106 m Seehöhe direkt am Alpenhauptkamm an der Grenze zwischen den Bundesländern Salzburg und Kärnten. Von Juni 2000 bis Juli 2010 wurden die Messungen mit einem URAS-14 Gerät (Hartmann und Braun 3.507855.9) durchgeführt. Für März 2012 ist die Wiederaufnahme der Messungen mit einem Gerät der Firma. Picarro (Cavity RingDown Spektrometer G2301) beabsichtigt. Neben CO_2 erlaubt das Gerät zudem die Messung von Methan (CH_4) und Wasserdampf (H_2O).

Seit 1999 wurde ein kontinuierlicher Anstieg der CO_2-Konzentration seit Jänner 1999 von knapp 0,18 ppm / Monat (Bestimmtheitsmaß: 0,63) verzeichnet. Dem Anstieg ist ein Jahresgang überlagert, der stark vom Jahresgang der Emissionen und der pflanzlichen Aktivität auf der Nordhemisphäre geprägt ist: Aufnahme von CO_2 durch die Vegetation im Sommer und höhere anthropogene Freisetzung von CO_2 im Winter (eine graphische Darstellung der Sonnblick-Daten findet sich in Band 1; Kapitel 2, eine vergleichende Darstellung mit den Messungen am Mauna Loa in Band 1, Kapitel 5).

[7] http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/luft/messnetz/

Das Österreichische UV-B-Messnetz

Um Gesundheitsgefährdungen durch UV-Strahlung (Sonnenbrand, Hautkrebs etc.) zu vermindern, ist es von großer Bedeutung, dass die Öffentlichkeit laufend auf hohem Qualitätsniveau über die aktuelle Strahlungsbelastung informiert wird. Dazu wurde 1998 im Auftrag des Lebensministeriums das Österreichische UV-B-Messnetz etabliert, welches von der Sektion für Biomedizinische Physik der Medizinischen Universität Innsbruck in Zusammenarbeit mit der Firma CMS Ing. Dr. Schreder GmbH, 6322 Kirchbichl kontinuierlich betreut wird.

Die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik betreibt die Stationen Dornbirn, Innsbruck, Mariapfarr und Klagenfurt. Die Stationen Steyregg, Bad Vöslau und Graz werden vom Umweltbundesamt in Kooperation mit den Umweltabteilungen der jeweiligen Bundesländer betrieben. Das Institut für Meteorologie der Universität für Bodenkultur betreibt die Stationen Sonnblick und Großenzersdorf. Die Station Gerlitzen wird vom Institut für Physik der Universität Graz und die Station Wien vom Institut für Medizinische Physik und Biostatistik der Universität für Veterinärmedizin betrieben.

Die Veröffentlichung der maximalen UV-Indexwerte des jeweiligen Tages sowie der Messwerte des Gesamtozongehaltes der atmosphärischen Ozonschicht am Hohen Sonnblick erfolgt im ORF-Teletext auf Seite 644. Die ausgewerteten Daten werden darüberhinaus täglich im Internet veröffentlicht. Die Zusammenhänge zwischen Klima und UV-Strahlung sind in Band 3, Kapitel 4 (Gesundheit und Tourismus) beschrieben.

3.1.3 Datenbearbeitung und -analyse

Metadaten

Unter Metadaten sind ganz allgemein alle Daten gemeint, die Informationen über andere Daten enthalten. Ohne Metadaten sind Datensätze nicht nutzbar, da sie grundlegende Informationen wie Koordinaten, Instrumentierung, die Lage der Station, ihre Umgebung, ob die Messung manuell oder automatisiert erfolgt und vieles mehr beschreiben. Wichtig zu wissen ist aber auch die Datenqualität: handelt es sich um Rohdaten, wurden die Daten korrigiert oder homogenisiert. Eine detaillierte Zusammenschau ist in Aguilar et al. (2003) gegeben. Metadaten spielen speziell für die Datenhomogenisierung eine große Rolle, da in den Metadaten sämtliche Informationen, die zu künstlichen Brüchen oder Trends führen könnten, gesammelt sein sollten (Auer et al., 2004). Meist werden Metadaten gar nicht, oder nur in begrenzter Auswahl (Stationskoordinaten und Seehöhe) über das Internet zur Verfügung gestellt z. B. von der ZAMG[8] oder der Hydrographie Österreich[9]. Andere Quellen sind beispielsweise die Jahrbücher der beiden genannten Institutionen.

Datenqualität

Diese Zusammenstellung über Datenqualität und Datenprüfung bezieht sich auf Prüfroutinen, die bei der ZAMG und der Hydrographie Österreich als wichtige Messnetzbetreiber Österreichs verwendet werden. Klimafolgenforschung erfordert präzise und qualitätsgeprüfte Datensätze[10] Besonders in den letzten Jahren stieg das öffentliche Interesse an klimarelevanten Themen. Dies und die Tatsache, dass durch die Erweiterung und Automatisierung des österreichischen Messnetzes auch das zu verarbeitende Datenvolumen gestiegen ist, erforderten eine Anpassung, Überarbeitung sowie Verbesserung ganzer Prüfroutinen und Applikationen, beispielsweise beschrieben in Lipa und Jurkovic (2012), Spengler et al. (2003), Streicher (2003), Gudlat et al. (2003), Stepanek (2011) und Jurkovic (2008).

Beschränkte man sich am Anfang noch auf die Prüfung von Tagesdaten, speziell Terminwerten durch DatenprüferInnen, die Korrekturen auf einem Klimabogen verzeichneten und keinerlei Informationen von Nachbarstationen verwenden konnten, werden mittlerweile täglich mehr als 1 Mio. Datensätze mit automatischen Prüfprogrammen innerhalb kürzester Zeit untersucht. Dabei durchlaufen die Werte eine klimatologische, zeitliche und räumliche Konsistenzprüfung sowie eine Vollständigkeitskontrolle. Die Endprüfung erfolgt nach wie vor durch regional geschulte BearbeiterInnen, welche komplexe Sachverhalte – die maschinell nur schwer erfasst werden können – rasch und effektiv aufgreifen, verarbeiten und individuell lösen können.

Die Hydrographie Österreichs prüft, korrigiert, archiviert und analysiert die erhobenen Daten mit dem Hydrographischen Datenmanagement System (HyDaMS). Diese Software beinhaltet Auswerte- und Bearbeitungsmodule zur Qualitätsprüfung hydrographischer Daten die von allen Hydrographischen Diensten in Österreich verwendet werden. Die Datenprüfung erfolgt beim Hydrographischen Dienst nach einheitlichen Regeln, die in spezifischen Anleitungen zusammengefasst sind. Neben der visuellen Prüfung von Ganglinien auf „Ausreißer" werden auch Vergleiche mit anderen meteorologischen Parametern und räumliche Konsistenzprüfungen

[8] http://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/messnetze/wetterstationen
[9] http://ehyd.gv.at
[10] http://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/messnetze/datenpruefung

durchgeführt. Vermehrt kommen auch teilautomatische Prüfroutinen zum Einsatz die den / die SachbearbeiterIn bei der Kontrolltätigkeit unterstützen. Die Kontrolle der nicht direkt gemessenen Durchflussganglinie an Oberflächengewässern, erfolgt zusätzlich durch den Spendenvergleich benachbarter Messstellen.

Homogenisierung

Homogenisieren ist ein aufwändiges aber notwendiges mathematisch-statistisches Verfahren, um lange Klimazeitreihen für die objektive Klimaforschung überhaupt erst nutzbar zu machen, da lange Zeitreihen von Inhomogenitäten betroffen sein können. Inhomogenitäten in den Klimazeitreihen verfälschen die Größenordnung der berechneten Trends. In Einzelfällen sind Trends inhomogener Zeitreihen sogar durch falsche Vorzeichen gekennzeichnet. Studien in der „Greater Alpine Region" (GAR) haben gezeigt, dass im Mittel für die HISTALP Zeitreihen Homogenität elementabhängig nur zwischen 12 (Sonnenscheindauer) und 31 (Luftdruck) Jahren gegeben ist. Für Lufttemperatur und Niederschlag wurden als mittleres homogenes Zeitintervall 23 Jahre berechnet. (Auer et al., 2007). Die Mittelung einer ausreichenden Anzahl von Stationen verringert zwar das Problem mit zufällig verteilten Inhomogenitäten, bringt aber keine Verbesserungen bei systematischen Veränderungen, die in einem Messnetz ziemlich gleichzeitig erfolgen. Beispiele dafür sind etwa eine Verschiebung der Beobachtungszeiten, neue Vorschriften für Mittelbildungen, die Einführung von Wetterhütten, die Höhe der Installation von Regenmessern, Automatisierung eines gesamten Messnetzes innerhalb kurzer Zeit und viele andere Ursachen.

Die ersten modernen Regenmessgeräte wurden Ende des 19. Jahrhunderts meist auf Hausdächern installiert, damit der Regen nicht durch Bäume oder Häuser abgeschirmt werden konnte. Durch die dort herrschende erhöhte Windverwirbelung konnte allerdings ein beträchtlicher Teil des Niederschlags nicht ins Messgerät fallen. Allein aus diesem Grund zeigen diese Messungen einen 10 % geringeren Niederschlag im Vergleich zu heute (Auer et al., 2005). Dies führte insbesondere bei Schneefall zu einer deutlichen Unterschätzung. Daher wurden die Messgeräte allmählich in bodennahe Aufstellungsorte verlegt, der Prozess war aber erst gegen 1950 abgeschlossen. Heute werden die Niederschlagsmessgeräte möglichst windgeschützt nahe dem Boden aufgestellt.

Vor der Einführung von Wetterhütten – der Prozess begann in der GAR ca. zwischen 1850 und 1870 – waren die Thermometer, obwohl meist an der Nordwand eines Hauses aufgestellt, unzureichend vor Sonnenstrahlung geschützt. Verglichen mit den heute ventilierten, in Wetterhütten installierten Thermometern waren Sommertemperaturen zu warm, Wintertemperaturen zu kalt, bei Überwiegen des Sommereffekts. Mit Hilfe der heute noch unveränderten Thermometeraufstellung in Kremsmünster konnten Böhm et al. (2009) diesen Effekt quantifizieren und letztlich für einzelne Stationen den „early instrumental warm bias" korrigieren. Die stärksten strahlungsbedingten negativen Korrekturen mussten im Juni angebracht werden (im Mittel 0,4 °C), leicht positive Korrekturen fanden sich im Februar und März.

Die Effektivität verschiedener Homogenisierungsmethoden von Monatsdaten wurde im Rahmen einer viereinhalb Jahre andauernden COST Aktion[11] mit Hilfe eines „Blind Benchmark Experiments" getestet (Venema et al., 2012). Die an der ZAMG verwendeten Verfahren HOCLIS (Auer et al., 2001b) basierend auf Craddock, 1979 und PRODIGE (Caussinus und Mestre, 2004) lieferten akzeptable Ergebnisse. Um gute Ergebnisse zu liefern, bedürfen beide (manuellen) Methoden jedoch der klimatologischen Erfahrung der anwendenden Person und der relevanten Metadaten (Aguilar et al., 2003).

Für die Homogenisierung täglicher Klimadaten, die in Österreich soeben aufgebaut wird, wird an der Zentralanstalt für Meteorologie die Prozedur HOMOP verwendet: Sprungdetektion auf Monatsbasis mit Hilfe von PRODIGE, Korrektur mit SPLIDHOM (Mestre et al., 2011). Die in Österreich gesammelten Erfahrungen beziehen sich auf tägliche Lufttemperaturextreme und Niederschlag (Nemec et al., 2012). Ein Resultat dieser Homogenisierung ist beispielsweise, dass bei den Temperaturen die an den Daten anzubringenden Korrekturen überwiegend negativ waren, wodurch die Temperaturen im früheren Teil der Zeitreihen gesenkt und somit die positiven Trends der Zeitreihen verstärkt wurden. Die Homogenisierung von täglichen Daten erfordert ein Anpassen der gesamten Häufigkeitsverteilung, aber aufgrund der geringeren Korrelation von Tagesdaten (Auer et al., 2004) ist die Dichte des Messnetzes für das in Österreich gegebene orographisch gegliederte Gelände nicht immer ausreichend. Aus diesem Grund waren 16 % der Niederschlagszeitreihen (Nemec et al., 2012) nicht homogenisierbar, da es an geeigneten Referenzen mangelte.

Für die dreidimensionale Erfassung des Klimawandels in der Atmosphäre stehen ab etwa 1950 Zeitreihen des globalen Radiosondennetzwerkes (ca. 1 000 Stationen weltweit) zur Verfügung. Sie messen meist zweimal täglich Temperatur, Wind und Luftfeuchtigkeit bis in Höhen von 20 bis 35 km. Die Instrumentierung wurde in den letzten Jahrzehnten stetig verbessert und systematische Temperaturmessfehler konnten

[11] http://www.homogenisation.org

Box 3.1: Trends

Wenn von einem Trend die Rede ist, ist im Allgemeinen ein linearer Trend gemeint. Dazu wird hauptsächlich die Methode des „least-square fitting“ verwendet. Ein heikler Punkt bei der Bestimmung eines Trends ist die verwendete Zeitspanne, da eine Verlängerung, Verkürzung oder Verschiebung der betrachteten Zeitscheibe eine Änderung im Trend nach sich ziehen kann. Der Effekt geänderter Zeitabschnitte kann mit der running trends-Analyse (Brunetti et al., 2006) untersucht werden. Wegen der hohen Unsicherheit bei der Trendbestimmung ist eine Abschätzung der Glaubwürdigkeit unerlässlich. Dies geschieht z. B. mit dem nicht-parametrischen Mann-Kendall-Test (Sneyers, 1990) oder dem gebräuchlichen Student-T-Test.

Eine andere Möglichkeit der Abschätzung von Unsicherheiten ist der Einsatz von Monte Carlo-Verfahren. Ein Beispiel dafür ist das Bootstrapping-Verfahren. Dabei wird aus dem vorhandenen Datensatz durch Zufallsverfahren eine Teilmenge (dabei können einzelne Werte, oder aber auch Datengruppen ausgewählt werden) entnommen und die statistische Untersuchung durchgeführt. Die sich durch ein oftmaliges Wiederholen der Auswertungen mit jeweils anderen, zufällig bestimmten Teilmengen ergebenden Unterschiede in den Resultaten sind ein Maß für die Unsicherheit.

vor allem in höheren Atmosphärenschichten von mehreren Kelvin in den Anfangsjahren auf wenige Zehntel Kelvin reduziert werden. Diese zeitliche Änderung des systematischen Messfehlers macht allerdings eine Homogenisierung der Radiosondentemperaturen unumgänglich, bevor sie für Analysen des Klimawandels verwendet werden können. Das trifft auch für die österreichischen Radiosondenstationen, vor allem der Hohen Warte in Wien zu, die bis 1951 zurückreicht (Zimmermann, 2009). International anerkannte automatische Homogenisierungsverfahren sind etwa in Haimberger et al. (2008), Haimberger et al. (2012), Sherwood et al. (2008) sowie Titchner et al. (2009), beschrieben. Auch globale Reanalysen wie ERA-Interim (Dee et al., 2011) verwenden mittlerweile, homogenisierte Radiosondendaten als Eingangsdaten. Systematische Fehler in Windmessungen, zum Beispiel durch falsche Einordnung der Stationen, können ebenfalls beträchtlich sein, sind aber oft sehr gut homogenisierbar (Gruber and Haimberger, 2008). Zeitreihen von Feuchtemessungen von Radiosonden, insbesondere vor 1990, sind meist sehr inhomogen. Versuche der Homogenisierung, wie in Dai et al. (2011) beschrieben, können grob unrealistische Sprünge in den Zeitreihen entfernen aber keine gesicherte Trendinformation liefern.

Austrian Climate Data Rescue

Climate Data Rescue ist die Sicherung des Datenbestandes durch Digitalisierung von historischen Originalaufzeichnungen (z. B. Klimabögen), welche nur in Archiven gelagert sind und so dem Risiko eines plötzlichen Verlustes oder schleichenden Verfalls ausgesetzt sind. Die Umsetzung der Climate Data Rescue Initiative[12] erfolgt in Österreich seit 2007 mit der Unterstützung des Bundesministeriums für Wissenschaft und Forschung. Von diesem Zeitpunkt an konnten rund 50 % der historischen Papierdaten digitalisiert, bearbeitet und damit für die Nachwelt gesichert werden.

Datenanalyse

In diesem Abschnitt werden einige in Kapitel 3 verwendete Begriffe und Methoden in aller Kürze erklärt. Ein Anspruch auf Vollständigkeit wird nicht erhoben. Für eine genauere Darstellung der genannten Methoden oder Information bezüglich mögliche Alternativen wird auf Chatfield (2004), Peña et al. (2001),Wilks (2006) und Daley (1993) verwiesen.

Eine Analyse von Daten kann mit einer Vielzahl von Datenquellen durchgeführt werden. Die im Folgenden genannten Methoden werden bei Stationsdaten angewandt, doch können hier auch Zeitreihen (regional gemittelter) Gitterpunkte aus Reanalysen (mit Hilfe Wettervorhersage-modellen im Nachhinein erstellte Karten des Zustandes der Atmosphäre zu einem gewissen Zeitpunkt) bzw. Klimamodelle zum Einsatz kommen. Eine Ausnahme bilden dabei die im Abschnitt Interpolation aufgezählten Methoden, bei der nur punktuelle Einzelwerte (z. B. Stationsdaten) zum Einsatz kommen.

Welche Methoden für die einzelnen Fragestellungen in Anwendung kommen ist von den Eigenschaften des untersuchten Parameters und der Fragestellung abhängig.

[12] http://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/messnetze/datenpruefung

Tabelle 3.1 Auflistung der Hauptextremwertindizes, nach <http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml>

Table 3.1 Climate Change Detetcion Indices, after <http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml>

FD0	Anzahl an Frosttagen	Frosttag: Temperaturminimum < 0 °C
SU25	Anzahl der Sommertage	Sommertag: Temperaturmaximum > 25 °C
ID0	Anzahl an Eistagen	Eistag: Temperaturmaximum < 0 °C
TR20	Anzahl der Tropennächte	Tropennacht: Temperaturminimum > 20 °C
GSL	Länge der Wachstumsphase	Zeitspanne zwischen den ersten 6 aufeinanderfolgenden Tagen mit Temperaturmittel > 5 °C ab dem 1. Jänner und den ersten 6 aufeinanderfolgenden Tagen mit Tmittel < 5 °C nach dem 1. Juli.
TXx	maximales Temperaturmaximum	
TNx	maximales Temperaturminimum	
TNn	minimales Temperaturminimum	
TXn	minimales Temperaturmaximum	
TN10p	Kühle Nächte	Prozentsatz der Tage (z. B. im Jahr) deren Temperaturminimum < als das 10. Perzentil der Temperaturminima aus betrachteter Klimaperiode ist
TX10p	Kühle Tage	Prozentsatz der Tage (z. B. im Jahr) deren Temperaturmaximum < als das 10. Perzentil der Temperaturmaxima aus betrachteter Klimaperiode ist
TN90p	Warme Nächte	Prozentsatz der Tage (z. B. im Jahr) deren Temperaturminimum > als das 90. Perzentil der Temperaturminima aus betrachteter Klimaperiode ist
TX90p	Warme Tage	Prozentsatz der Tage (z. B. im Jahr) deren Temperaturmaximum > als das 90. Perzentil der Temperaturmaxima aus betrachteter Klimaperiode ist
WSDX	Dauer von Hitzeperioden	Jährliche Anzahl von Tagen bei denen mindestens 6 aufeinander folgende Tage eine maximale Temperatur höher als das 90te Perzentil haben.
CSDI	Dauer von Kälteperioden	Jährliche Anzahl von Tagen bei denen mindestens 6 aufeinander folgende Tage eine minimale Temperatur kleiner als das 10te Perzentil haben
DTR	tägliche Temperaturschwankung	Mittlere Differenz Temperaturmaximum – Temperaturminimum
RX1day	monatlicher Maximalniederschlag	Maximale eintägige Niederschlagssumme / Monat
RX5d	monatliches 5tägiges Niederschlagmaximum	Maximale fünftägige Niederschlagssumme / Monat
SDII	Einfacher Niederschlagsintensitätsindex	Summe des Niederschlages dividiert durch die Niederschlagstage mit einer Menge > 1 mm
R10	Anzahl der Tage mit Niederschlag > 10 mm	
R20	Anzahl der Tage mit Niederschlag > 20 mm	
Rnn	Anzahl der Tage mit Niederschlag > nn mm	(nn = beliebige Niederschlagmenge)
CDD	maximale Länge von Trockenperioden	Maximale Anzahl aufeinanderfolgender Tage mit Niederschlag < 1 mm
CWD	maximale Länge von Niederschlagsepisoden	Maximale Anzahl aufeinanderfolgender Tage mit Niederschlag ≥ 1 mm
R95p	Gesamtniederschlagssumme von Tagen mit Niederschlag > dem 95er-Perzentil der betrachteten Klimaperiode	
R90p	Gesamtniederschlagssumme von Tagen mit Niederschlag > dem 90er-Perzentil der betrachteten Klimaperiode	
PRCP-TOT	Gesamtniederschlag	Summe aller Niederschläge an Tagen mit Niederschlag > 1 mm

Zeitreihenanalyse

Die Auswertung ausreichend langer Klimareihen erfolgt mit Methoden der Zeitreihenanalyse: Zur Sichtbarmachung der längerfristigen Entwicklung verwendet man Filterfunktionen, die kurzzeitige Schwankungen unterdrücken. Ein häufig gebrauchter Filter ist der Gauß'sche Tiefpassfilter. In den dargestellten Österreichzeitreihen des Abschnitts 3.2.5 werden durch die Verwendung der Filterweite von 20 Jahren kürzere Schwankungen unterdrückt.

Zur Beschreibung der Variabilität verwendet man meist die Standardabweichung oder den Interquartilbereich (Bereich zwischen dem kleinsten und dem größten Viertel der Daten).

Um einen Zusammenhang zwischen Zeitreihen des gleichen Parameters an unterschiedlichen Stationen bzw. Zeitreihen unterschiedlicher Parameter zu erkennen werden Korrelationen (meist Pearson'sche Korrelationskoeffizienten) verwendet. Für nicht normalverteilte Korrelationen wird z. B. die Fischers z-Transformation angewendet.

Eigenwertmethoden (z. B. Principal Component Analysis (PCA)) eignen sich zum Auffinden von Unterschieden in den Zeitreihen, Stationen in Gruppen zusammenzufassen, fehlende Daten zu rekonstruieren oder Zusammenhänge zwischen unterschiedlichen Datensätze zu untersuchen. Eine Aufteilung der Stationen in unterschiedliche Gruppen ist auch mit der Methode der Clusteranalyse möglich.

Extremwertindizes

Extremwertindizes kommen häufig zum Einsatz, wenn es um die Abschätzung von Klimaänderungen in den Extremen geht. Sie geben die Häufigkeit an, mit der ein gewisses Phänomen, das als Extremwert angesehen wird, in den einzelnen Jahren vorkommt.

Zur Auswertung von meteorologischen Extremen existieren einige Sammlungen international anerkannter Definitionen wie beispielsweise jene aus STARDEX[13] und ECA&D[14].

In Abschnitt 3.2.6 finden die in Tabelle 3.1 angeführten 27 Indizes, die alle auf täglichen Temperatur- und Niederschlagsdaten basieren und bei einer Zusammenarbeit mehrerer internationaler Arbeitsgruppen ausgewählt wurden (ETCCDI / CRD-Homepage[15]). Man beachte leichte Abweichungen von den in Österreich üblichen Definitionen, wo z. B. auch ein Tag mit T_{max} = 25 °C als Sommertag gilt.

Die Verwendung dieser Indizes erlaubt eine Untersuchung der Häufigkeit beziehungsweise der Trends unterschiedlicher spezieller Wettersituationen (z. B. Anzahl der Frosttage, Anzahl der Niederschlagstage), die auf Menschen, Tiere oder Pflanzen einen wichtigen Einfluss haben, aber auch Änderungen, die ausschließlich auf der Verteilung z. B. der Temperatur an sich basieren, können untersucht werden (z. B. kühle und warme Tage). Ein großer Vorteil der vereinheitlichten Indizes, ist die Vergleichbarkeit der Resultate aus unterschiedlichen Untersuchungen. Die Indizes können für Jahre, Jahreszeiten oder Monate berechnet und ausgewertet werden.

Neben diesen Größen gibt es weitere gebräuchliche Parameter, etwa die Zahl der Kysely-Hitzeperioden (Kyselý 2004). Diese sind als mindestens 3 aufeinanderfolgende Tage mit einer Maximaltemperatur über 30 °C definiert. Das Ende der Periode ist erst erreicht, wenn die maximale Temperatur an einem Tag unter 25 °C oder die mittlere Maximaltemperatur aller Tage der Periode unter 30 °C liegt. Der Palmer Drougth Severity Index (PDSI) bestimmt über Niederschlag und Temperatur auf Monatsbasis Zeitspannen von Trockenheit bzw. von Feuchtigkeit im Vergleich zum Klimamittel. Er bezieht sich auf die Bodenfeuchte und wurde für unterschiedliche Regionen der Erde entsprechend den dortigen Bedingungen angepasst.

Extremwertstatistik

Für die Bestimmung von Wiederkehrzeiten extremer Ereignisse kommt im Falle des Niederschlages häufig die generalisierte Extremwertverteilung, die Weibull- oder die Gumbel-Verteilung zur Anwendung. Mit der r-largest order-Methode (Coles, 2001) wird diese Verteilung an die stärksten Ereignisse in jedem Jahr angepasst. Die POT-Methode (Peaks over Threshold) verwendet alle Ereignisse, die einen gewählten Schwellwert überschreiten (Davison und Smith, 1990). Es ist zu beachten, dass die für die Anpassung verwendeten Daten unabhängig voneinander sind, also nicht von einem Ereignis (z. B. längere Niederschlagsepisode) stammen. Um die Qualität der Anpassung zu testen kann unter anderem der Kolmogorov-Smirnov-Test zum Einsatz kommen.

Was in diesem Zusammenhang als Extremwert definiert wird, kommt auf das zu untersuchende Phänomen an. Es kann sich dabei um Werte über einem gewissen Schwellwert (z. B. Warnstufen) handeln, oder um Werte, deren Häufigkeit unter einer gewählten Perzentilgrenze liegen.

[13] http://www.cru.uea.ac.uk/projects/stardex/deis/Diagnostic_tool.pdf
[14] http://eca.knmi.nl/indicesextremes/indicesdictionary.php
[15] http://etccdi.pacificclimate.org/index.shtml

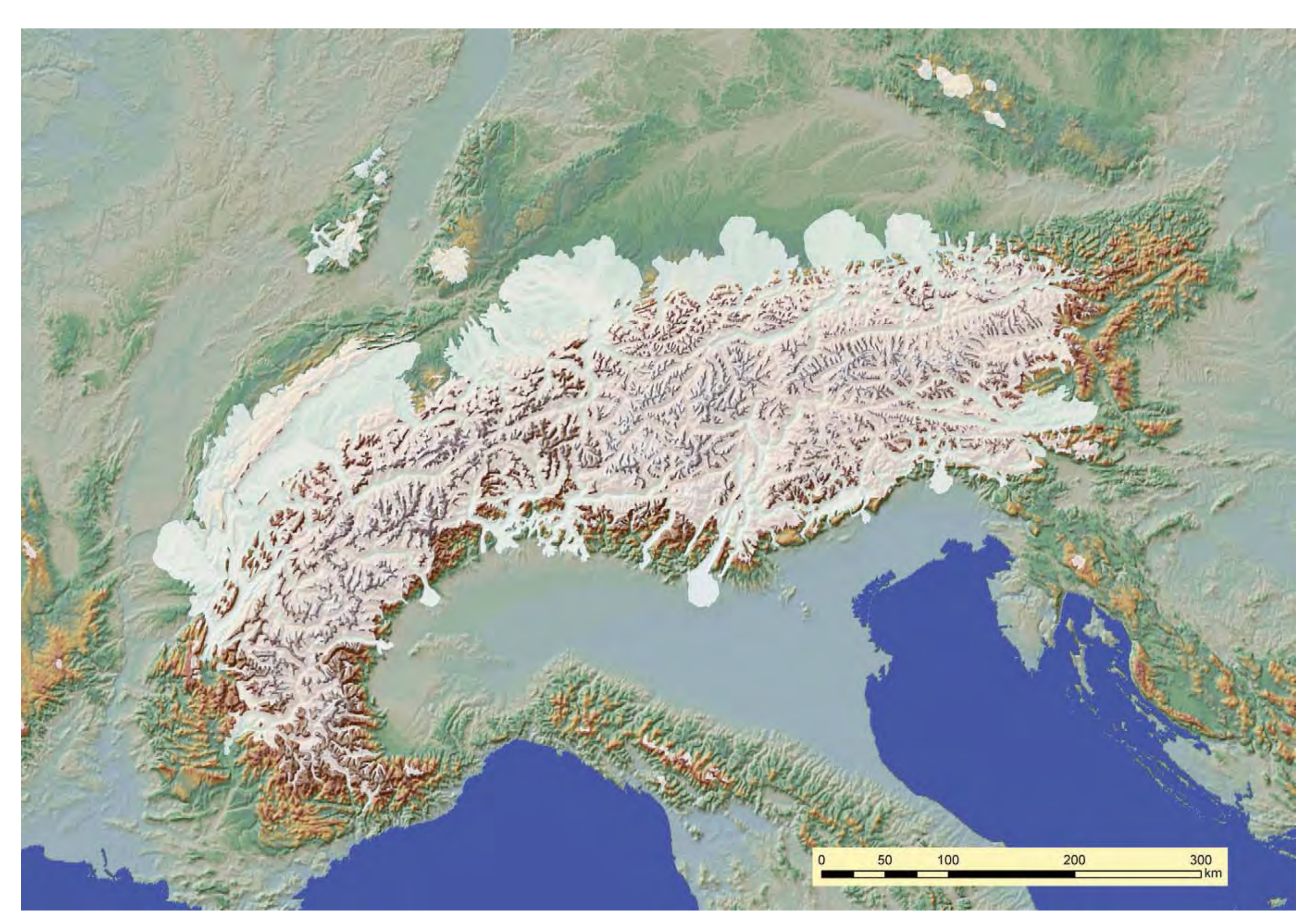


Abbildung 3.2 Die maximale Eisausdehnung im Alpenraum während des letzten Hochglazials (Ehlers, 2011; auf der Grundlage von Ehlers und Gibbard, 2004). Die Eisfläche ist in Weiß gehalten. Die Abnahme der Größe der lobenförmigen Vorlandgletscher von West nach Ost und das Ende des zusammenhängenden Eisstromnetzes östlich des Gesäuses ist Ausdruck des damaligen ausgeprägten zonalen Feuchtigkeitsgradienten. Die Land-Meer-Verteilung entspricht dem heutigen Zustand; aufgrund des Meeresspiegeltiefstandes war der Nordteil der heutigen Adria damals Festland

Figure 3.2 Ice extent (in white) in the Alps during the last glacial maximum (Ehlers, 2011; based on Ehlers and Gibbard, 2004). The west-east decrease in the size of the lobate piemont glaciers emerging from the ice-stream network is an expression of the pronounced zonal moisture gradient at that time. The land-sea distribution is that of today; due to the sea-level lowstand the northern part of the Adriatic Sea was emerged land during the last glacial maximum

Interpolationen

Die Interpolation von Messdaten ist hilfreich um Information über den Parameter in Bereichen zu erhalten, in denen keine Messungen vorgenommen werden. Dabei werden die an den Stationen gemessenen Werte verwendet, meist unter Verwendung von zusätzlicher Information etwa über das Gelände, um an regelmäßig verteilten Gitterpunkten Daten zur Verfügung zu haben.

Grundsätzlich gibt es unterschiedliche Ansätze. Die Wahl der Methode hängt von der gewünschten Auflösung (räumlich und zeitlich) und dem Zweck der Analyse ab. Kriging ist eine weitverbreitete Interpolationsmethode, von der es zahlreiche für unterschiedliche Fragestellungen optimierte Arten gibt. Die Unterschiede betreffen zum Beispiel die Möglichkeit, Trends in den Daten zu berücksichtigen. Die beim Kriging verwendeten Gewichte sind von der Entfernung und der Kovarianz der Stationen untereinander abhängig. Das führt dazu, dass geclusterte Stationen nicht überbewertet werden. Die zweite große Interpolationsfamilie ist der Spline. Bei diesem wird die Interpolation über eine Minimierungsbedingung, die aus einer Glattheitsbedingung (etwa möglichst geringe räumliche Krümmung) in Kombination mit einem gewichteten sogenannten Penaltyterm besteht, durchgeführt. Dadurch wird nicht nur die Glattheit des Feldes, sondern auch die Übereinstimmung des interpolierten Feldes mit den Messdaten berücksichtigt. Neben den Stationsdaten und daraus abgeleiteten Größen kann bei den unterschiedlichen Interpolations-

methoden auch noch zusätzliche Information z. B. physikalische Zusammenhänge oder Information aus Modellfeldern verwendet werden.

Eine häufig verwendete Methode zur Evaluierung der verwendeten Interpolationsmethode ist die Cross-Validation, bei der jeweils einzelne Stationen nicht für die Interpolation verwendet werden, sodass der Messwert mit dem interpolierten Wert verglichen werden kann.

3.2 Resultate
3.2 Results

3.2.1 Klima im Pleistozän

Dieses Kapitel bietet einen Blick auf den langfristigen Verlauf des Klimas in Österreich, lange vor dem Beginn der Umweltbeeinflussung durch den Menschen. Der Fokus liegt dabei auf dem Pleistozän, das vor 2,6 Mio. Jahren begann und vor 11 700 Jahren endete. Pleistozän und Holozän (die letzten 11 700 Jahre) bilden zusammen das Quartär, den jüngsten Abschnitt der Erdgeschichte. Die Zeit der Umweltbeeinflussung durch den Menschen wird auch als Anthropozän bezeichnet. Die Einblicke in den langfristigen natürlichen Klimaverlauf des Pleistozäns sind dabei wesentlich für das Verständnis des Klimas des Holozäns.

Die hohe Reliefenergie der Alpen bietet zwar ein denkbar schlechtes Potential für eine langfristige Erhaltung von Klima-Archiven, trotzdem begegnet man dort Spuren früherer Klimaperioden sprichwörtlich auf Schritt und Tritt: Das Antlitz der Alpen mit seiner akzentuierten Hochgebirgsmorphologie wurde erst durch die gewaltigen, klimagesteuerten Umweltereignisse des Pleistozäns geschaffen, durch die großen Eiszeiten.

Die Evidenz im Gelände

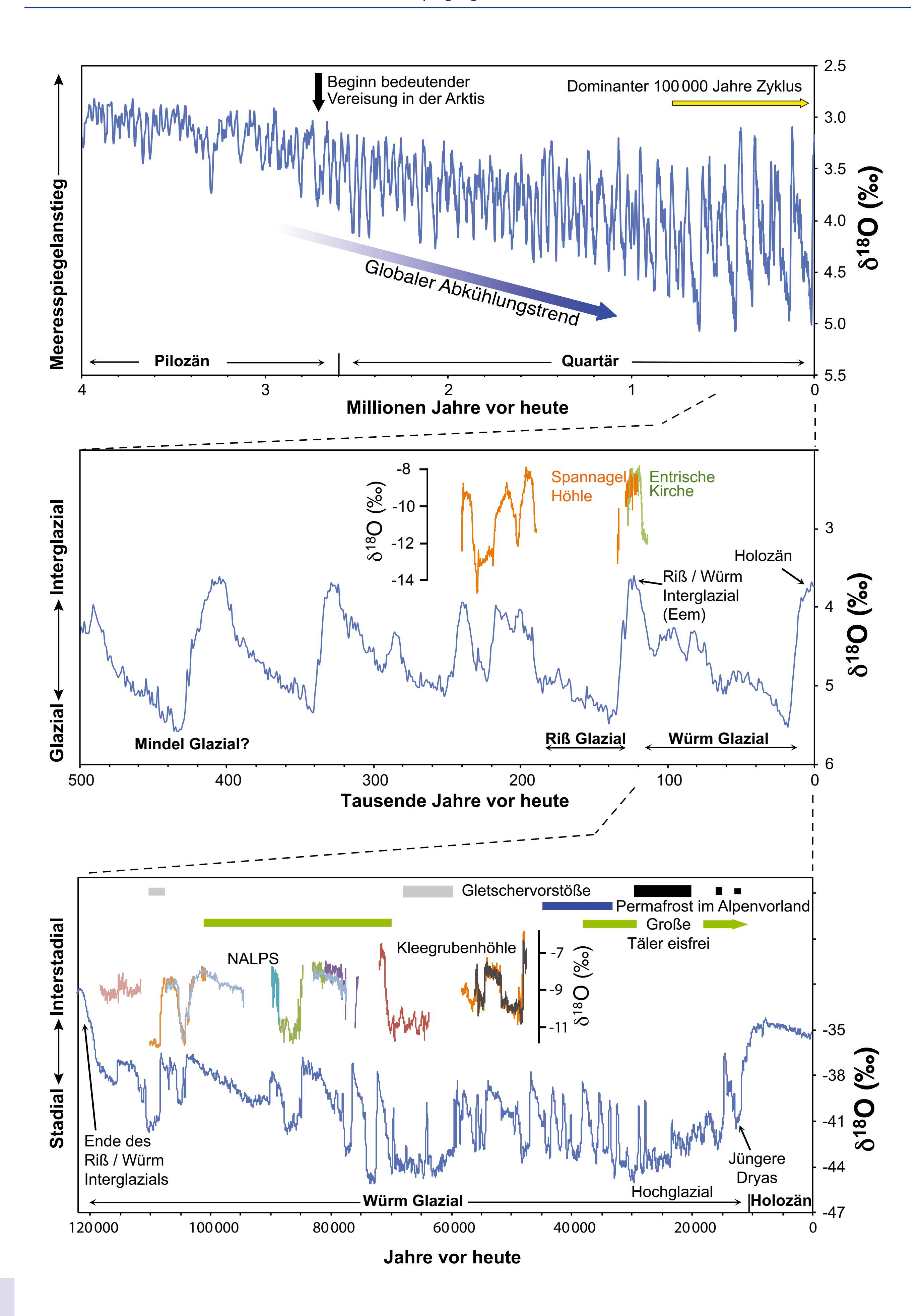
Bereits im 19. Jahrhundert begonnene Geländekartierungen zeichnen ein klares Bild des mehrfachen Anwachsens der zentralalpinen Gletscher und ein Vorstoßen dieser gewaltigen Eismassen über die großen Täler und den Rand des Gebirges hinaus. Moränen-Wälle im Alpenvorland und daran anschließende, terrassierte Fluss-Schotterebenen zeugen von diesen Eiszeiten. Die Spuren der vier jüngsten Maximalstände im Pleistozän sind gut erhalten und traditionell mit den Namen Günz, Mindel, Riss und Würm belegt (Penck und Brückner, 1901; van Husen, 2000, 2004). Der jüngste dieser Maximalvorstöße (gegen Ende des Würm-Glazials) begann vor etwa 30 000 Jahren und erreichte vor etwa 26 000 Jahren seinen Höhepunkt (Monegato et al., 2007). Abbildung 3.2 zeigt den Alpenbogen in diesem hochglazialen Zustand. Das vorhergehende Glazial, die Riss-Eiszeit, ist zeitlich bereits deutlich schwieriger zu fassen, dürfte aber ihren Höhepunkt vor ca. 140 000–160 000 Jahren gehabt haben (Dehnert et al., 2010). Die Chronologie der noch älteren alpinen Vereisungen ist unsicher. Licht in dieses Dunkel bringt paradoxerweise ein Blick in die Tiefsee.

Klima-Archiv Ozean

Am Boden der Tiefsee findet sich in Form von Sedimenten das weltweit vollständigste Archiv des Klimas und der Umweltveränderungen am Festland. Anhand von Analysen an tausenden Bohrkernen dieser Sedimente wurde der Verlauf der globalen Klimaänderungen rekonstruiert, die auch Europa und Österreich betroffen haben (Abbildung 3.3[2]).

Die Hauptzielgröße auf langfristigen Zeitskalen ist die Menge an Eis am Festland und die damit korrelierte Meeresspiegelhöhe. Letztere wird aus der Änderung der Sauerstoff-Isotopenzusammensetzung mariner Organismen abgelesen, deren Skelette in den Tiefseesedimenten eingelagert sind. Während 80–90 % des Quartärs war der Meeresspiegel tiefer als heute, das Wasser war in den Eisschilden in den hohen Breiten, aber auch in den Eisstromnetzen und Vorlandgletschern von Gebirgen wie den Alpen gespeichert. Das Klima war generell kälter und trockener. Innerhalb dieser langen Glaziale sank der Meeresspiegel zu gewissen Zeiten auf extreme Werte von bis zu 130 m unter dem heutigen Wert ab (Lambeck et al., 2002); so geschehen während der Hochglaziale, den eigentlichen Eiszeiten, in denen u. a. auch die alpinen Gletscher ihre maximale Ausdehnung erreichten. Der Blick in das Tiefsee-Archiv offenbart zudem, dass es während des Pleistozäns dutzende Glaziale gegeben hat (Lisiecki und Raymo, 2005), also weit mehr, als die klassische Eiszeitgliederung der Alpen nahelegt.

Zwischen diesen Glazialen herrschte ein warmes Klima, das mit geringerer Eisausdehnung und hohem Meeresspiegel einherging. Wir leben gegenwärtig in einer solchen Zwischeneiszeit (Interglazial), dem Holozän. Noch etwas wärmere Bedingungen und ein um ein paar Meter höherer Meeresspiegel (Dutton und Lambeck, 2012) herrschten während des letzten Interglazials (Eem), welches von 130 000 bis 117 000 Jahren währte und zwischen Riss- und Würm-Glazial datiert.


Beginn bedeutender Vereisung in der Arktis
Dominanter 100 000 Jahre Zyklus
Globaler Abkühlungstrend
Meeresspiegelanstieg
Pilozän
Quartär
Millionen Jahre vor heute
δ18O (‰)
Interglazial
Glazial
Spannagel Höhle
Entrische Kirche
Holozän
Riß / Würm Interglazial (Eem)
Mindel Glazial?
Riß Glazial
Würm Glazial
Tausende Jahre vor heute
Gletschervorstöße
Permafrost im Alpenvorland
Große Täler eisfrei
NALPS
Kleegrubenhöhle
Interstadial
Stadial
Ende des Riß / Würm Interglazials
Jüngere Dryas
Hochglazial
Holozän
Jahre vor heute

Die glaziale Klimadynamik

Festländische Klimaarchive wie beispielsweise das Eis der heute noch existierenden Eisschilde in Grönland und der Antarktis bieten die Möglichkeit den Klimaverlauf innerhalb der langen Glaziale genauer zu rekonstruieren. Dabei zeigt sich ein dramatisches Bild: In Zeiten mit generell ausgedehnten Eisschilden und starker Gebirgsvergletscherung sowie Trockenheit in Monsungebieten (den Stadialen) traten Perioden wärmeren und feuchteren Klimas auf, die zwischen einigen Hundert und wenigen Tausend Jahren dauerten (Dansgaard et al., 1993; North Greenland Ice Core Project (NGRIP) members: Andersen et al, 2004). Dabei geschah die Klimaänderung am Beginn dieser sogenannten Interstadiale (oder Dansgaard-Oeschger Ereignisse) jeweils abrupt, d. h. innerhalb von ein bis drei Jahren (Steffensen et al., 2008). In Grönland betrug die Änderung der Jahresmitteltemperatur zwischen Stadialen und Interstadialen 8–15 °C (Huber et al., 2006).

Die Ursache dieser Dansgaard-Oeschger Ereignisse wird in der internen Dynamik der gewaltigen pleistozänen Eisschilde der Nordhemisphäre gesehen, die Instabilitäten aufwiesen und von Zeit zu Zeit kollabierten, damit einen immensen Schmelzwasser-Eintrag in den Atlantik bewirkten und in weiterer Folge dessen Tiefenwasser-Zirkulation veränderten (Clement und Peterson, 2008; Wolff et al., 2010).

Pleistozäne Klimadaten aus Österreich

Abbildung 3.3 gibt einen vereinfachten Überblick über die letzten vier Glazial-Interglazial-Zyklen und die aus dieser Zeit erhalten gebliebenen klimarelevanten Spuren. Es sind im Wesentlichen vier Archive, auf die sich die Klimageschichte des Pleistozäns in Österreich stützt: Ablagerungen von Gletschern und in Höhlen sowie Seesedimente und Löss. Jedes dieser Archive weist Stärken und Schwächen auf und bietet nur mehr oder minder kurzzeitige Einblicke in die Vergangenheit und ihre Klimaverhältnisse. Die Ursache hierfür ist, dass einerseits die Bildung dieser Archive nur in gewissen Perioden des Pleistozäns und damit nicht kontinuierlich erfolgte, andererseits vieles nicht erhalten blieb. Der allergrößte Teil der Proxy-Daten aus dem alpinen Pleistozän ist zudem qualitativer Natur und die Güte der Chronologie nimmt mit zunehmendem Alter stark ab.

Klimainformation aus Ablagerungen im Umfeld von Gletschern

Die pleistozänen Gletscher als Abbild des Klimas haben in vielfältiger Weise ihre Spuren in der Landschaft hinterlassen. Schliffgrenzen im Hochgebirge und Moränenwälle im Vorland erlauben die Rekonstruktion des Eistromnetzes zum Höhepunkt der letzten Eiszeit (van Husen, 1987; Bini et al.,

Abbildung 3.3 Klimakurven seit Ende des Tertiärs und ausgewählte Klima-Archive und Ereignisse in Österreich. Top: Veränderung der globalen Vereisung (Schwankungen des Meeresspiegels; Lisiecki und Raymo, 2005) seit 4 Mio. Jahre vor heute. Mitte: Detail aus dieser Tiefsee-Sauerstoff-Isotopenkurve für die letzten 0,5 Mio. Jahre und die alpinen Eiszeiten. Oberhalb der marinen Isotopenkurve sind kontinuierliche Proxy-Klimadaten aus Höhlensinter österreichischer Höhlen geplottet (Holzkämper et al., 2004, 2005; Meyer et al., 2008; Spötl et al., 2008), deren Isotopenänderungen den globalen glazial-interglazialen Rhythmus widerspiegeln, aber eine unabhängige Chronologie besitzen. Unten: Ausschnitt des letzten Glazial-Interglazial-Zyklus aufgezeichnet in den Sauerstoff-Isotopenwerten des grönländischen Eises (North Greenland Ice Core Project (NGRIP) members: Andersen et al., 2004; Chronologie nach Wolff et al., 2010). Oberhalb der Grönlandkurve sind Isotopenreihen aus ost- und westalpinen Höhlen verzeichnet (Kleegrubenhöhle: Spötl et al., 2006; diese Isotopenwerte wurden graphisch um +4 ‰ erhöht um sie auf die gleiche Skala wie die anderen Höhlensinter-Daten zu bringen; NALPS: Boch et al., 2011a). Die dunklen horizontalen Balken indizieren große Vorstöße der Alpengletscher (schwarz: belegt, grau: vermutet). Der blaue horizontale Balken zeigt jenen Zeitbereich an, in dem im niederösterreichischen Löss vermehrt Anzeiger für strengen Permafrost auftreten (Haesaerts et al., 1996; Nigst et al., 2008; Thiel et al., 2011b). Die grünen Balken markieren Zeiten, in denen die großen Täler und Becken der Ostalpen nachweislich eisfrei waren (Spötl und Mangini, 2006, sowie Zusammenstellung in Starnberger et al., 2011)

Figure 3.3 Climate curves since the end of the Tertiary and selected climate archives and events in Austria. Top panel: Changes in global ice volume (sea-level fluctuations; Lisiecki and Raymo, 2005) during the last four million years. Middle panel: close-up of this deep-sea oxygen isotope curve for the last 0.5 million years and Alpine glaciations. Continuous proxy data from speleothems of Austrian caves (Holzkämper et al., 2004, 2005; Meyer et al., 2008; Spötl et al., 2008) are plotted above the marine curve. These cave data mirror the glacial-interglacial rhythm but are based on independent chronologies. Lower panel: part of the last glacial-interglacial cycle as recorded by oxygen isotope data in Greenland ice (North Greenland Ice Core Project members, 2004; chronology of Wolff et al., 2010). Isotope time series from east- and westalpine caves are plotted above the Greenland curve (Kleegrubenhöhle: Spötl et al., 2006; these values were shifted by +4‰ to plot them on the same scale as the other speleothem data; NALPS: Boch et al., 2011). The dark horizontal bars show major advances of Alpine glaciers (black: proven, gray: assumed). The horizontal blue bar indicates the time period when strong permafrost occurred in loess deposits of Lower Austria (Haesaerts et al., 1996; Nigst et al., 2008; Thiel et al., 2011b). The green bars mark intervals when major valleys and basins in the Eastern Alps were ice-free (Spötl and Mangini, 2006, and compilation in Starnberger et al., 2011)

2009). Die Schneegrenze lag damals fast 1,5 km tiefer als zur Mitte des 20. Jahrhunderts. Kuhlemann et al. (2008) nehmen, basierend auf einem Höhengradienten von 6,5 °C / km, für die Ostalpen eine Temperaturabsenkung zwischen etwa 10 und 12 °C bezogen auf das Temperaturniveau des 20. Jahrhunderts an, wobei es sich vermutlich um eine Sommertemperatur-Information handelt. Paläotemperatur-Abschätzungen aus dem Umfeld der Alpen, basierend auf Edelgaskonzentrationen in fossilem Grundwasser und Temperaturmessungen in tiefen Bohrlöchern, gehen von einer Abkühlung im Hochglazial relativ zum Holozän-Mittel von mindestens 5 °C und bis zu ca. 12 °C aus (Beyerle et al., 1998; Šafanda und Rajver, 2001; Corcho Alvarado et al., 2012). Über die Eisdynamik innerhalb der langen Glazialepochen (und insbesondere über Gletscher-Minima) vermögen glaziale Sedimente kaum Auskunft zu geben, da nachfolgende Gletschervorstöße ältere Spuren meist verwischt haben.

Die Kartierung der Schliffgrenzen im Hochgebirge hat für die Westalpen gezeigt, dass die Eisscheide im letzten Hochglazial etwas südlicher lag als der Alpenhauptkamm (Florineth und Schlüchter, 2000); dies ist ein starker Hinweis dafür, dass die hochglazialen Gletscher dominant von südanströmender Feuchtigkeit genährt wurden, was mit den Richtung Äquator verschobenen Zugbahnen der Westwinde während dieser Zeit (Laîné et al., 2009) und der weit nach Süden reichenden Winter-Meereisbedeckung des Nordatlantiks zusammenhing. Analoge atmosphärische Strömungsverhältnisse sind auch für die Ostalpen anzunehmen, d. h. eine starke Reduktion des Feuchttransports aus NW bei gleichzeitigem Überwiegen der Niederschläge aus dem Mittelmeerraum mit insgesamt ungleicher Niederschlagsverteilung zwischen Nord- und Südalpen. Pflanzenfunde aus gletscherrandnahen Sedimenten unterstützen diesen starken Süd-Nord-Gradienten quer über den Alpenkörper: Während am Rand der südalpinen Gletscher im Hochglazial noch lichte Nadelwälder existierten (Pini et al., 2009; Kaltenrieder et al., 2009) herrschten am Nordrand der Alpen arktische Wüstenbedingungen. Auch in West-Ost-Richtung nahm die Kontinentalität stark zu. So bildeten sich z. B. im Grazer Bergland selbst während der Hochglazialzeiten aufgrund der Trockenheit keine Gletscher aus.

Die Dynamik der Ostalpengletscher im Hochglazial war im Detail betrachtet komplex. Neue Daten zeigen, dass der Tagliamento Gletscher einen zweifachen Hochstand im Hochglazial aufwies (26 500 bis 24 000 sowie 22 000 bis 21 000 Jahre vor heute; Monegato et al., 2007), der vermutlich im Zusammenhang mit sogenannten Heinrich-Ereignissen im Nordatlantik stand. Eine solche Zweiphasigkeit wurde auch an ostalpinen Gletschern festgestellt, z. B. am Traungletscher (van Husen, 1977) und am Salzach-Gletscher (Starnberger et al., 2011).

Direkte Reste pleistozänen Eises sind im Übrigen in keinem der Ostalpengletschern mehr vorhanden; dazu waren die Effekte der Erwärmung während des holozänen thermalen Maximums in diesem Alpenteil zu stark bzw. ist generell die Fließbewegung alpiner Gletscher zu hoch. Geringe Reste von späteiszeitlichem Eis könnten allerdings in den tiefsten Schichten einiger sehr hoch gelegener, angefrorener Eiskappen in den Westalpen erhalten geblieben sein (z. B. Monte Rosa; Jenk et al., 2009).

Klimainformation aus Seesedimenten

Seen stellen Sedimentfallen dar und erlauben im Idealfall eine kontinuierliche Aufzeichnung von Proxy-Daten. Pleistozäne See-Ablagerungen sind zwar nicht selten, wurden aber in Österreich nur an wenigen Stellen genauer untersucht. Ein Beispiel ist das Tiroler Unterinntal bei Baumkirchen, wo bis zu 250 m mächtige, feinkörnige Sedimente auftreten, die im oberen Abschnitt etwa 35 000 Jahre alt sind (Fliri, 1973; Fliri et al., 1970, Fliri et al., 1972; Spötl et al., 2013). Sie belegen zum einen, dass die Temperaturabnahme und der Eisvorstoß des Würm-Hochglazials erst kurz nach dieser Zeit einsetzten und die zentralalpinen Gletscher damals nicht bis in die Haupttäler reichten. Zum anderen wurden Pflanzenreste gefunden, die darauf hinweisen, dass am Rande dieses Sees eine spärliche Strauchtundren-Vegetation existierte. Dies deutet auf Klimaverhältnisse hin, die in etwa den gegenwärtigen oberhalb der alpinen Baumgrenze vergleichbar sind. Eine genaue Zuordnung der Inntaler Seesedimente zu bestimmten Dansgaard-Oeschger-Ereignissen ist bislang nicht möglich gewesen.

Eine noch ältere Sequenz erschlossen Bohrungen am Nordrand des Mondsees in Oberösterreich. Dort wurde eine Abfolge von Seesedimenten gefunden, die vom Beginn des letzten Interglazials bis etwa in die Mitte des Würm-Glazials reicht. Großreste von Pflanzen und Pollen zeigen große Schwankungen der Waldgrenze als Abbild der Klimaentwicklung: Ein Waldsterben am Ende des letzten Interglazials und eine zweimalige Wiederbewaldung im frühen Würm (Oeggl und Unterfrauner, 2001; Drescher-Schneider, 2001).

Am Samerberg unweit der Grenze Bayern / Tirol wurde eine vergleichbare Vegetationsabfolge erbohrt. Anhand von Pollen wurde eine quantitative Abschätzung der Temperatur- und Niederschlagsänderung versucht. Dabei zeigte sich, dass das Ende des letzten Interglazials mit einer Temperaturabnahme des kältesten Wintermonats von etwa 7 °C einherging, während die Temperatur des wärmsten Sommermonats nur um

etwa 2 °C zurückging (Klotz et al., 2004). Zusammen mit der zeitgleich erfolgten Abnahme des Jahresniederschlages auf die Hälfte unterstreichen diese Daten die drastische Zunahme der Kontinentalität am Übergang von Warm- zu Kaltzeiten (Müller und Kukla, 2004).

Klimainformation aus Höhlen

Alpine Höhlen haben sich in den letzten Jahren als Quelle für wesentliche Neuerkenntnisse zum Klima des Pleistozäns entwickelt, insbesondere zu dessen zeitlichem Verlauf. Was mit Oberflächensedimenten aus methodischen Gründen kaum möglich ist, gelang mittels Tropfsteinen (Höhlensinter) aus mehreren Höhlen der Alpen: Etwa die präzise Datierung des Anfangs und Endes des letzten Interglazials, welches vor 130 000 Jahren begann und vor 117 000 Jahren in das Würm-Glazial überging (Spötl et al., 2007a; Meyer et al., 2008). Innerhalb dieses Interglazials zeigt die Sauerstoffisotopen-Signatur der Tropfsteine eine große Konstanz, die für geringe Änderungen in der Temperatur innerhalb dieser 13 000 Jahre spricht (Holzkämper et al., 2004). Weiters konnte erstmals in den Alpen die Klimadynamik des vorletzten Interglazials (von vor etwa 240 000 bis vor 190 000 Jahren) anhand von Tropfsteinen präzise aufgezeigt werden (Spötl et al., 2008): Diese Warmzeit war dreigeteilt und erreichte zu keiner Zeit Temperaturwerte wie sie in den beiden nachfolgenden Interglazialen, Eem und Holozän, herrschten.

Tropfsteine erlauben mittlerweile auch wesentliche Einblicke in die Klimaentwicklung innerhalb der langen Glaziale. Die Isotopenkurven aus den Höhlen ähneln sehr stark dem aus Grönland und aus dem zirkumatlantischen Raum für das Würm-Glazial bekannten Bild der rapiden Klimaschwankungen (Spötl et al., 2006; Abbildung 3.3). Da die Archive beider Regionen (Grönland und die Alpen) auf dem gleichen Proxy ($\delta^{18}O$) basieren, sind diese Daten ein Schlüsselbeweis, dass die Dansgaard-Oeschger Ereignisse auch im Alpenraum das dominante Klimamuster während der pleistozänen Kaltzeiten waren. Die Datierung dieser Ereignisse anhand der alpinen Höhlensedimente deckt sich im Fehler der Messungen mit der aus dem grönländischen Eis gewonnenen Zeitskala, was die Synchronität des hochfrequenten glazialen Klimawandels unterstreicht (Boch et al., 2011a).

Eine Umrechnung der Isotopenwerte aus Tropfsteinproben in Temperaturwerte ist derzeit noch nicht möglich: Die großen Isotopensprünge am Beginn der Interstadiale sind jedoch nur durch eine sprunghafte Abnahme der Saisonalität (mildere Winter) zeitgleich mit der insgesamt erfolgten Erwärmung zu erklären.

Klimainformation aus Löss

Ein häufiger Sedimenttyp außerhalb des ehemals vergletscherten Bereichs ist Löss, windtransportierter Staub. Er erreicht in Ober- und Niederösterreich vielerorts mehrere Meter an Mächtigkeit und zeigt einen Wechsel von Glazial- und Interglazialzeiten an, letztere manifestiert durch fossile Bodenhorizonte. Dieses Muster lässt sich an einigen Lokalitäten weit in das Pleistozän zurückverfolgen (Fink und Kukla, 1977; van Husen und Reitner, 2011). Innerhalb des Würm-Glazials lassen sich an Lokalitäten mit hoher Sedimentationsrate Interstadiale (durch schwache Bodenbildung) von den eigentlichen eiszeitlichen, durch Gletscheranwachsen gekennzeichneten Perioden (Stadiale) unterscheiden und bestätigen so das Bild der Dansgaard-Oeschger Klimarhythmik für das Alpenvorland. Einzelne dieser vegetationsarmen Stadiale weisen in den Löss-Profilen zudem Spuren von Permafrost auf, die gehäuft ins Hochglazial datieren (Thiel et al., 2011a, b; Terhorst et al., 2011); ein starker Hinweis, dass zu dieser Zeit auch im Alpenvorland arktische Klima-Bedingungen mit sehr kalten Wintern geherrscht haben.

Klima-Antrieb und Klima-Zukunft – die langfristige Perspektive

Der stete Wechsel von langen Glazialen und kurzen Interglazialen ist das prägende Bild des globalen Klimas im Quartär und Ausdruck seiner orbitalen Steuerung auf Wellenlängen zwischen 19 000 und 400 000 Jahren (Hays et al., 1976). Die präzise bekannten, langfristigen Schwankungen der Erdbahnelemente (z. B. die Neigung der Erdachse relativ zur Umlaufbahn der Erde um die Sonne) bewirken eine graduelle Änderung der Verteilung der Sonnenenergie an der Grenze der Atmosphäre (die Insolation), welche über eine Kaskade von Rückkoppelungen Eiszeit-Warmzeit-Zyklen steuert (Milankovitch-Theorie). Diese Insolations-Änderungen erklären u. a. die großen Eisvorstöße (auch in den Alpen) sowie die unterschiedlich langen und warmen Interglaziale.

Für die langfristige Zukunft ist prinzipiell mit weiteren Eiszeit-Warmzeit-Zyklen zu rechnen, da die orbitale Steuerung weiterhin gegeben ist. Die Dauer des gegenwärtigen Interglazials, des Holozäns, ist jedoch unklar, da nach Modellrechnungen beim derzeitigen Niveau des CO_2-Gehalts der Atmosphäre (390 ppm) keine neuerliche Vereisung eintreten wird (Tzedakis et al., 2012). Ohne anthropogene Beeinflussung wäre ein Ende des Holozäns in rund 50 000 Jahren zu erwarten (Berger et al., 2003).

3.2.2 Klima im Spätglazial

Das alpine Spätglazial und damit die Termination I begann mit dem endgültigen Zerfall der großen Vorlandgletscher der Alpen und dem Eisfreiwerden der Endmoränen im Alpenvorland. Dabei werden die Verhältnisse im Gebiet des Inngletschers als Bezug verwendet (Chaline und Jerz, 1984; Reitner, 2011). Der Beginn des Eiszerfalls ist nicht genau fassbar; nach den Datierungen von Steinhof bei Solothurn (ehemalige nordöstliche Zunge des Rhonegletschers; Ivy-Ochs et al., 2004) dürfte ein Zeitraum vor etwa 20 000 bis 21 000 Jahren realistisch sein. Konventionell dauert das Spätglazial bis zum Beginn des Holozäns vor 11 700 Jahren, gletschergeschichtlich ist es aber sinnvoll, es noch bis in das früheste Holozän auszudehnen.

Eiszerfallsphase

Eine erste Stabilisierungsphase beim Zusammenbruch des Eisstromnetzes ist im Gebiet des Tiroler Unterinntals und im Raum Brixental - Wilder Kaiser nachweisbar. Damals stießen einige Lokalgletscher vor, während der Hauptgletscher im Inntal ohne erkennbare Unterbrechung abschmolz (Reitner, 2005a, 2007). Vergleichbare Situationen hat es auch in den anderen großen Längstälern der Ostalpen gegeben (Reitner 2003a, 2003b, 2005b). In den Westalpen mit ihren kürzeren Tälern und den um rund 1 000 m höheren Gipfeln fanden in diesem Zeitabschnitt deutliche Vorstöße von großen Lokalgletschern statt (Schoeneich, 1998; Coutterand und Nicoud, 2005), die wegen ihrer geringeren Länge und größeren Höhenerstreckung merkbar auf Klimaänderungen reagieren konnten. Neuvorstöße in den Ostalpen waren auf höhere Talabschnitte beschränkt und hingen mit dem weiter zerfallenden Eisstromnetz räumlich zusammen (Steinachstadium; Mayr und Heuberger, 1968).

Diese Eiszerfallsphase im frühen Spätglazial dürfte nach den wenigen vorliegenden Daten um 19 000 Jahre vor heute zentriert sein (Klasen et al., 2007; Reitner, 2011). Das innere Salzkammergut (Mitterndorfer Becken) war bereits vor 18 000 bis 19 000 Jahren eisfrei (Radiokarbondatum von Rödschitz; van Husen, 1977), womit das Ende dieser Phase markiert ist. In den eisfreien Gebieten ermöglichten die wärmeren Bedingungen eine Wiederbesiedlung mit Pioniervegetation und kälteresistenten Gehölzen. So kam es im Klagenfurter Becken während einer wärmeren Phase vor 18 500 bis 18 100 Jahren zur Ausbreitung von Kiefern, die von einer stufenweisen Abkühlung bis vor 17 600 Jahren und einer dreigeteilten Kaltphase bis vor 16 900 Jahren gefolgt wurde, während der die sommerlichen Wassertemperaturen um etwa 8,5–10 °C tiefer waren als heute (Schmidt et al., 2009; Huber et al., 2010; Schmidt et al., 2012). Nach den wenigen klimageschichtlich interpretierbaren Spuren kann man diesen ersten Abschnitt des Spätglazials qualitativ durch sehr lange und kalte Winter, kurze und kühle Sommer und eine bedeutende Niederschlagsarmut charakterisieren. Durch das Ausschmelzen von Toteis, die folgende Erosion und fluviatile Umlagerung der Eisrandsedimente, die zeitweise Existenz großer Seen und die allgemein hohe morphologische Dynamik im Anschluss an das Eisfreiwerden ist der anschließende, mehrere Jahrtausende einnehmende Zeitabschnitt (das „Mystery Interval“ von Denton et al., 2006) gletschergeschichtlich kaum dokumentiert.

Gschnitz – Älteste Dryas

Ein längerer Gletschervorstoß, von dem an einigen Stellen in den Alpen große End- und Ufermoränensysteme erhalten sind, wird nach der Typlokalität im Gschnitztal südlich von Innsbruck als Gschnitzstadium bezeichnet. Er fällt in die Zeit des „Heinrich-1-Ereignisses“ im Nordatlantik (Ivy-Ochs et al., 2006), bei dem über einen Zeitraum von wenigstens mehreren Jahrhunderten große Mengen an Eisbergen vom Laurentischen Eisschild in Nordamerika in den Nordatlantik kalbten (Bond et al., 1992; Hemming, 2004). Nach heutigen Befunden dürften die Moränen vor ungefähr etwa 16 000 Jahren stabilisiert worden sein (Ivy-Ochs et al., 2006). Die Schneegrenze lag an der namensgebenden Örtlichkeit bei Trins im Gschnitztal rund 700 m tiefer als um 1850 n. Chr. An einzelnen Stellen im südlichen Ostalpenraum (Karnische und Julische Alpen) dürfte die Schneegrenzdepression deutlich größer (Kerschner und Ivy-Ochs, 2007) gewesen sein. Für etwa 16 400 bis 16 000 Jahre vor heute und damit zeitlich synchron ist im Klagenfurter Becken eine weniger ausgeprägte Kaltphase nachgewiesen, der eine kürzere wärmere Periode vorausging (Schmidt et al., 2009, 2012; Huber et al., 2010).

Eine klimageschichtliche Interpretation des Gletschers im Gschnitztal (Ivy-Ochs et al., 2006) zeigt, dass die jährlichen Niederschlagssummen damals zwischen rund einem Drittel und der Hälfte der heutigen Mengen betrugen. Die Sommertemperaturen lagen etwa 10 °C unter den heutigen Werten und die Dauer der Ablationsperiode an der Schneegrenze in 1 950 m betrug nur rund 50 Tage. Insgesamt war damals das Klima einem hochglazialen Klima noch recht ähnlich und ermöglichte im Talbereich eine Strauch- und Grastundra als Vegetation. Das entspricht gut den Schlussfolgerungen über kalte Sommer und sehr kalte Winter, die für diese Zeit aus

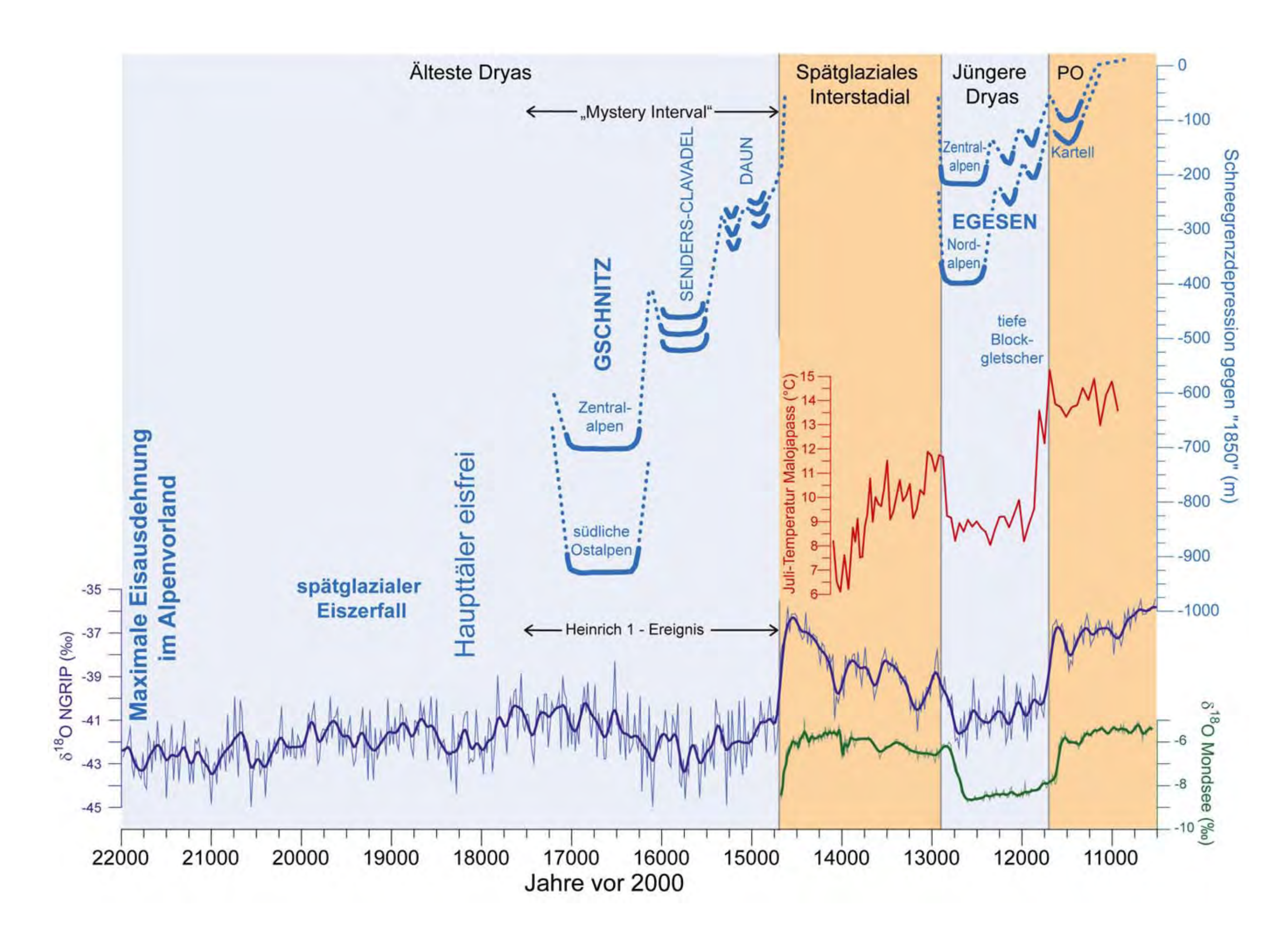


Abbildung 3.4 Sauerstoffisotopenkurve des grönländischen Eises der NGRIP Bohrung (GICC05 Chronologie; Andersen et al., 2006; Rasmussen et al., 2006) und von Ostrakoden (Muschelkrebsen) eines Bohrkernes im Mondsee (Lauterbach et al., 2011), Juli-Temperatur am Malojapass (Ilyashuk et al., 2009) und gletschergeschichtliche Ereignisse (Vorstöße, Zerfallsphasen) während des Spätglazials in den Ostalpen. Die unterschiedlichen Schneegrenzdepressionswerte für das Senders-Clavadel-Stadium und Daunstadium geben schematisch den Unsicherheitsbereich und eventuelle regionale Unterschiede wieder. PO steht für Präboreale Oszillation. Die Zeitangaben für das „Mystery Interval" und das Heinrich 1 - Ereignis beziehen sich auf Denton et al. (2006) und Hemming (2004)

Figure 3.4 Figure 3.4 Lowering of the equilibrium line altitude as a proxy for Lateglacial glacier extent combined with temperature proxies during the Alpine Lateglacial. Oxygen isotope curves from the NORTHGRIP ice core (Greenland, GICC05 chronology, Andersen et al, 2006; Rasmussen et al., 2006) and from ostracods from Lake Mondsee (Austria, Lauterbach et al., 2011), July temperature at Maloja pass (Switzerland, Ilyashuk et al., 2009), glacier advances and decay during the Alpine Lateglacial in the Eastern Alps. ELA depressions for the Senders-Clavadel-Stadial and Daun Stadial schematically show the range of uncertainty and possible regional differences. PO is Preboreal oscillation. Chronological data for the „Mystery Interval" and the Heinrich 1 event are from Denton et al. (2006) and Hemming (2004)

der Analyse von Käferfaunen für das Schweizer Mittelland abgeleitet wurden (Coope und Elias, 2000). Trotz dieser strengen Klimabedingungen fällt die erste Nutzung der tiefer gelegenen, eisfreien Gebiete durch den Menschen in diese Zeit (Leesch et al., 2012).

Nach dem Gschnitzstadium erfolgte über einen Zeitraum von etwa 1 000 Jahren eine weitere Serie von ineinander geschachtelten, immer kleineren Gletschervorstößen (Senders/Clavadel- und Daunstadium), die gut dokumentiert, aber noch nicht datiert sind. Ihre Schneegrenzdepression lag zwischen 400 und 500 m für das Senders-Clavadel-Stadium und etwa 250 bis 300 m für das Daunstadium. Nach den Befunden aus dem Engadin sollte das Clavadelstadium älter als 15 500 Jahre sein (Studer, 2005; Maisch in Ivy-Ochs et al., 2008). Diese Gletscherstadien weisen teilweise auf jahrzehnte- bis jahrhundertelange Zeitabschnitte mit vergleichsweise stabilen klimatischen Bedingungen hin, weil ihre Moränen sehr sedimentreich sind, was durch schnelle und nur kurz andauernde Vorstöße kaum zu erklären wäre. Da die Gletscher aber sukzessive kleiner wurden, muss das Klima allmählich immer ungünstiger für ihre Existenz geworden sein. Dabei ist offen, ob der Grund für diesen Gletscherrückzug in einer Erwär-

mung oder in zunehmend trockeneren Bedingungen gesucht werden muss.

Insgesamt war diese frühe Phase des Spätglazials durch eine stetige Abnahme der vergletscherten Flächen, einige dazwischen eingeschobene Vorstöße und allgemein noch recht kalte und trockene Klimabedingungen gekennzeichnet. Eine anschließende wärmere und auch feuchtere Periode leitete zum spätglazialen Interstadial über (Schmidt et al., 2012).

Das spätglaziale Interstadial (Bølling / Allerød)

Die rasche Erwärmung am Beginn des Bølling-Interstadials (vor 14 700 Jahren) beendete endgültig jene Serie von Gletschervorstößen, die mit dem Gschnitzstadium begann. Während des spätglazialen Interstadials kam es zwar zu einer Reihe kleinerer bzw. kurzfristiger Klimaschwankungen, wofür jedoch keine Moränensysteme bekannt sind. Spuren von Gletschervorstößen während dieses Zeitabschnittes von ca. 2 000 Jahren wurden von den nachfolgenden Gletschervorstößen der Jüngeren Dryas ausgelöscht (Ohlendorf, 1998).

Detaillierte Einblicke in den Klimaverlauf des Bøllings und Allerøds erlauben Sedimentabfolgen mehrerer Alpenseen. Die an Muschelkrebsschalen (Ostrakoden) gemessenen Sauerstoffisotopenwerte zeigen am Beginn des Bøllings einen sprunghaften Anstieg auf ein Niveau, das fast mit jenem des Holozäns vergleichbar war (von Grafenstein et al., 1999; Lauterbach et al., 2011). Daraus lassen sich generell hohe Jahresmitteltemperaturen ableiten, wenngleich eine quantitative Angabe schwierig ist. Das spätglaziale Interstadial war laut diesen Daten unterbrochen durch drei kurzzeitige Abkühlungsphasen gefolgt vom Übergang in die Jüngere Dryas (Abbildung 3.4). Ingesamt zeigen die Sauerstoff-Isotopenprofile ein alpenweit recht einheitliches Bild, das dem aus dem grönländischen Eis stark ähnelt. Die Datierung dieser Klimaänderungen ist dabei im Fehler gleich mit der in Grönland.

Pollen und Zuckmückenlarven (Chironomiden) aus Sedimenten des besonders gut untersuchten Gerzensees im Schweizer Mittelland belegen einen rapiden Anstieg der Juli-Temperatur am Beginn des Bøllings von 2–3 °C (Zuckmückenlarven) bzw. 4–5 °C (Pollen; Lotter et al., 2012). Innerhalb dieses Interstadials zeigen diese beiden Bio-Proxies divergierende Trends: Die Zuckmückenlarven zeigen einen generellen Erwärmungstrend während die Pollen das Gegenteil andeuten. Angaben zur Änderung der Wintertemperatur können mit diesen biologischen Proxies nicht getätigt werden.

Die Jüngere Dryas

Die Klimaschwankung der Jüngeren Dryas (12 900–11 700 Jahre vor heute) brachte zum letzten Mal kaltzeitliche Verhältnisse. Sie ist durch zahlreiche vegetationsgeschichtliche, paläolimnologische und gletschergeschichtliche Befunde dokumentiert (Abbildung 3.4).

Einer Waldgrenzabsenkung um etwa 500 m (Burga und Perret, 1998) entspricht eine Sommertemperatur, die etwa 3,5 °C niedriger als im Mittel des 20. Jahrhunderts war. Diese Werte stimmen mit neueren paläolimnologischen und vegetationsgeschichtlichen Untersuchungen am Malojapaß (Ilyashuk et al., 2009) und am Gerzensee (Lotter et al., 2012) überein.

Aus der Sicht der Seesedimente zeigt die Jüngere Dryas ein grönländisches Bild: Rasche Abkühlung vor ca. 12 900 Jahren, ziemlich konstante Jahresmitteltemperaturen während des Stadials und sehr rasche Erwärmung am Beginn des Holozäns (Schmidt et al., 1998; von Grafenstein et al., 1999; Lauterbach et al., 2011). Höhlensinter-Daten aus dem Allgäu bestätigen dieses auf Sauerstoffisotopen beruhende Bild (Wurth et al., 2004). Zuckmückenlarven aus Seesedimenten am Malojapaß lassen eine Juli-Temperatur-Depression von ca. 3 °C während der Jüngeren Dryas relativ zum Ende des vorausgehenden Allerød-Interstadials erkennen (Ilyashuk et al., 2009).

Mehrere Gletschervorstöße während der Jüngeren Dryas hinterließen ganze Serien von End- und Ufermoränen, die teilweise regelrechte Landmarken darstellen. Sie werden unter dem Namen „Egesen-Stadium“ zusammengefaßt. Der Maximalvorstoß fiel dabei an den Beginn der Jüngeren Dryas, während die Moränen der kleineren Vorstöße gegen Ende der Jüngeren Dryas stabilisiert wurden (Ivy-Ochs et al., 2009).

Die Schneegrenze des Maximalstandes lag im trockenen Zentralalpenraum etwa 200 bis 250 m tiefer als um 1850 n. Chr. In etwas exponierteren zentralalpinen Räumen, z. B. auf Pässen, betrug die Schneegrenzdepression etwa 300 m, während sie in den Nordalpen bei 400 m und darüber lag. Im Süden des Alpenraums dürften 300 m typisch gewesen sein (Kerschner et al., 2000; Federici et al., 2008; Ivy-Ochs et al., 2009). Da die Schneegrenzdepression in den gut abgeschirmten Tälern deutlich geringer als an den Außenflanken der Alpen war, liegt eine Abhängigkeit von den Niederschlagsmengen nahe. Demnach waren die inneralpinen Trockengebiete markanter ausgeprägt als heute und von einem feuchten Nord- und Südsaum umgeben. Die feuchten Gebiete griffen dort am weitesten in das Alpeninnere hinein, wo Täler mit tiefliegenden Talböden direkt nach Norden und Nordwesten hinausführen (Hertl und Kerschner, 2001).

Während späterer Phasen der Jüngeren Dryas entwickelten sich in vielen Gebieten große Blockgletschersysteme in Bereichen, die am Anfang der Jüngeren Dryas noch vergletschert waren (Sailer und Kerschner, 1999; Frauenfelder et al., 2001). Diese heute reliktischen Blockgletscher reichen in günstigen Lagen von 1700 bis 1900 m Seehöhe, ca. 600 m tiefer als heute aktive Blockgletscher (tiefe Blockgletscher in Abbildung 3.4), während zeitgleich die Schneegrenzdepression nur etwa 150 bis knapp 250 m betrug. Dementsprechend dürfte die Erniedrigung der Jahrestemperatur, die für die Blockgletscherverbreitung maßgeblich ist, deutlich kräftiger gewesen sein als die der Sommermonate. Insgesamt entspricht dieses Bild gut den Ergebnissen aus pollenanalytischen und paläolimnologischen Untersuchungen, die im Alpenraum auf eine Zweiteilung der Jüngeren Dryas in einen älteren kühl-feuchten und einen jüngeren kalt-trockenen Abschnitt hinweisen (z. B. Welten, 1982; Schmidt et al., 2002a).

Die wahrscheinlich wesentlich drastischere Änderung der Wintertemperatur (Denton et al. 2005) kann mit Bioindikatoren und Gletscherbefunden nicht erfasst werden, zeichnet sich aber in neuesten Analysen von Höhlensintern ab (Luetscher et al., 2011).

Übergang zum Holozän

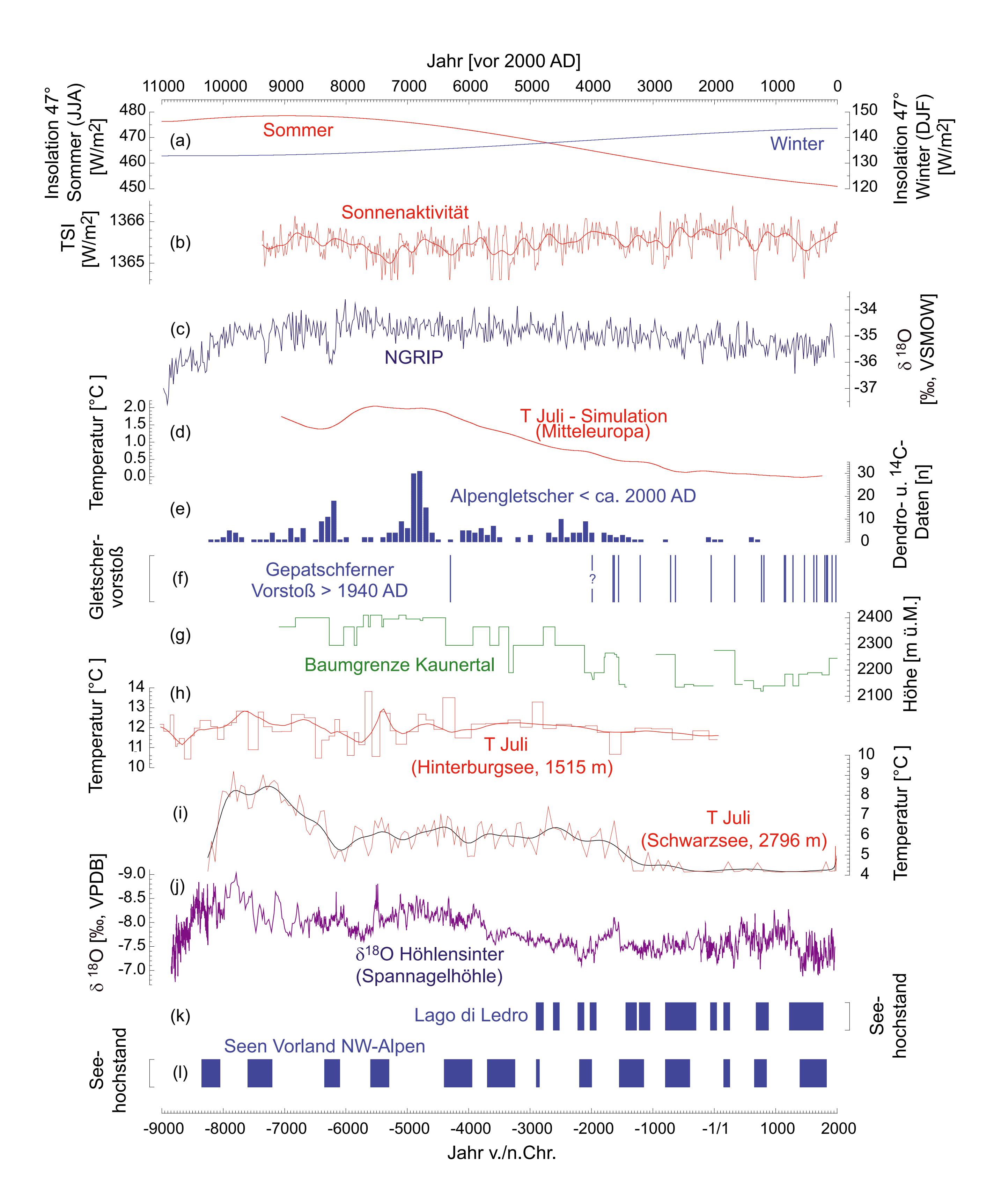
Zwischen den innersten, jüngsten Moränen des Egesenstadiums und den Moränen der neuzeitlichen Größenordnung („1850er Moränen“) findet man vielerorts Moränensysteme, deren Gletscher deutlich größer als um 1850 waren. An einer besonders schön entwickelten Stelle im Moostal in der Ferwallgruppe wurde dafür der Ausdruck „Kartell-Schwankung“ geprägt (Fraedrich, 1979). Die Schneegrenzdepression lag dort bei 120 m bezogen auf 1850. Datierungen von Moränen und Blockgletschern ergaben ein Alter im Bereich von etwa 11000 Jahren für deren Stabilisierung. Damit kommt am ehesten die Präboreale Oszillation (Björck et al., 1997; Schwander et al., 2000) als Auslöser in Frage. Die Entwicklung von Blockgletschern im Bereich von egesenzeitlichen Gletschervorfeldern (Larstig-Phase) in diesem Zeitraum (Ivy-Ochs et al., 2009) zeigt, dass der Permafrost damals noch rund 200 m tiefer als im 20. Jahrhundert existieren konnte. Geht man davon aus, dass die Präboreale Oszillation zum ersten Mal nach dem Ende der Jüngeren Dryas wieder kurzfristig feuchtere Verhältnisse brachte (Schmidt et al., 2006; Magny et al., 2007), so würde man für das Kartellstadium eine Sommertemperaturdepression von etwa 1,5–2 °C gegen das Mittel des 20. Jahrhunderts annehmen können. Vor etwa 10500 Jahren waren schließlich die großen alpinen Gletscher bereits kleiner als heute (Nicolussi und Patzelt, 2001; Joerin et al., 2008).

3.2.3 Klima im Holozän

Das derzeitige Interglazial, als Holozän bezeichnet, begann vor 11700 Jahren (Walker et al., 2009). Im Gebiet des heutigen Österreich ist diese Epoche von der zunehmenden Umwandlung vieler, ursprünglich rein natürlichen Prozessen unterliegender Landschaftsräume in durch menschliches Agieren geprägte Kulturlandschaften gekennzeichnet. Diese Entwicklung begann mit der neolithischen Revolution und erreichte spätestens in der Bronzezeit auch die Hochgebirgsregionen der Alpen (Bortenschlager, 2000; Drescher-Schneider, 2007; Oeggl und Nicolussi, 2009; Reitmaier, 2010). Dies geschah vor dem Hintergrund vergleichsweise – im Verhältnis zur Variabilität während glazialer Phasen – stabiler klimatischer Verhältnisse.

Der Kenntnisstand zur Klimaentwicklung und -variabilität in Österreich bzw. im Alpenraum während des Holozäns ist in den letzten etwa drei Jahrzehnten deutlich gewachsen. Dies hat auch zur Korrektur und Neubewertung früherer Ergebnisse geführt (Patzelt und Bortenschlager, 1973; Leemann und Niessen, 1994; Hormes et al., 2001). Nicht zuletzt die Gebirgsregionen, die spezielle Klimaarchive wie Gletscher bieten, gestatten die Erstellung von aussagekräftigen Proxy-Datensätzen. Trotz der Fortschritte beruht der gegenwärtige Wissensstand weitgehend auf der Interpretation von Klimaproxys und nur mit wenigen Ausnahmen auf kalibrierten Rekonstruktionen einzelner Klimaelemente, in der Regel (Sommer-)Temperaturwerten. Die Genauigkeit der zeitlichen Einordnung der erfassten Proxy-Variabilität beruht meist auf der Präzision der verwendeten radiometrischen Datierungsmethoden und erreicht im holozänen Bereich meist bereits wenige Jahrzehnte (z. B. Vollweiler et al., 2006; Ilyashuk et al., 2011). Ausgenommen von Datierungsunschärfen sind auf Jahrringdatierungen beruhende Zeitangaben, die Kalenderjahrpräzision aufweisen (Spurk et al., 1998; Nicolussi et al., 2009).

Die meisten der bisher erarbeiteten Proxy-Datensätze, die das Holozän zumindest weitgehend abdecken, weisen einen Temperaturbezug auf (Abbildung 3.5 e–j) beziehungsweise stellen überhaupt Temperaturrekonstruktionen dar (Abbildung 3.5 h, i). Ersteres gilt auch für Gletscher, deren Massenhaushaltsvariabilität im Alpenraum in überwiegendem Ausmaß durch die sommerlichen Klimaverhältnisse gesteuert ist (vgl. Abschnitt Spätglazial). Der Kenntnisstand zur Entwicklung der Niederschlagstätigkeit im Holozän ist demgegenüber vergleichsweise begrenzt (Lauterbach et al., 2012; Boch und Spötl, 2011).



Jahr [vor 2000 AD]
11000 10000 9000 8000 7000 6000 5000 4000 3000 2000 1000 0
Insolation 47° Sommer (JJA) [W/m2]
480 470 460 450
(a)
Sommer
Winter
150 140 130 120
Insolation 47° Winter (DJF) [W/m2]
TSI [W/m2]
1366 1365
(b)
Sonnenaktivität
(c)
NGRIP
-34 -35 -36 -37
δ 18O [‰, VSMOW]
Temperatur [°C]
2.0 1.5 1.0 0.5 0.0
(d)
T Juli - Simulation (Mitteleuropa)
(e)
Alpengletscher < ca. 2000 AD
30 20 10 0
Dendro- u. 14C-Daten [n]
Gletscher-vorstoß
(f)
Gepatschferner Vorstoß > 1940 AD
?
(g)
Baumgrenze Kaunertal
2400 2300 2200 2100
Höhe [m ü.M.]
Temperatur [°C]
14 13 12 11 10
(h)
T Juli (Hinterburgsee, 1515 m)
(i)
T Juli (Schwarzsee, 2796 m)
10 9 8 7 6 5 4
Temperatur [°C]
δ 18O [‰, VPDB]
-9.0 -8.5 -8.0 -7.5 -7.0
(j)
δ18O Höhlensinter (Spannagelhöhle)
(k)
Lago di Ledro
See-hochstand
Seen Vorland NW-Alpen
See-hochstand
(l)
-9000 -8000 -7000 -6000 -5000 -4000 -3000 -2000 -1000 -1/1 1000 2000
Jahr v./n.Chr.

Ergebnisse alpiner Klimaarchive

Der Übergang Spätglazial-Holozän ist durch eine rasche Temperaturzunahme gekennzeichnet (Ilyhashuk et al., 2009), spätestens vor 11 000 Jahren, bzw. kurz danach dürften die klimatischen Bedingungen die jenen der folgenden Abschnitte des Holozäns entsprechen, erreicht worden sein. Das kann aus den Belegen für entsprechend weit zurück geschmolzene Gletscherzungen (Slupetzky, 1993), Holzfunden im holozänen Waldgrenzbereich (Nicolussi et al., 2004) und aus Isotopendaten von Höhlensintern (Fohlmeister et al., 2013) geschlossen werden.

Befunde zur holozänen Gletscherentwicklung lassen unterschiedliche klimatische Verhältnisse im frühen (bis etwa 8 000 Jahre vor heute) und mittleren (bis 4 000 Jahre vor heute) beziehungsweise im späten Holozän ableiten. Wesentlich für diese generelle Einschätzung sind Funde von organischem Material, meist Baumreste, aber auch Torfmaterial, die in den letzten beiden Jahrzehnten vor und an zurückschmelzenden Enden von Alpengletschern gemacht wurden (Slupetzky, 1993; Nicolussi und Patzelt, 2001; Hormes et al., 2001; Jörin et al., 2006, 2008; Nicolussi und Schlüchter, 2012). Diese Funde datieren mit wenigen Ausnahmen in das frühe und mittlere Holozän. Die bis zu rund 800 Jahrringe aufweisenden Baumstämme belegen für einzelne Gletscher (z. B. Pasterze, Glacier du Mont Miné, Tschierva Gletscher) lange andauernde Rückschmelzphasen mit deutlich kürzeren Gletschern als gegenwärtig. Expositionsanalysen am Rhone Gletscher belegen, dass dieser Gletscher im Holozän während rund 6 500 ± 2 000 Jahren geringer ausgedehnt war als gegenwärtig (Goehring et al., 2011). Dieser kumulative Zeitrahmen dürfte weitgehend dem frühen und mittleren Holozän zuzuweisen sein. Zwar sind für diese Perioden auch Vorstöße einzelner Gletscher nachweisbar, es fehlen jedoch klare Evidenzen für weitreichende Vorstöße mit Gletscherständen vergleichbar den vielfach belegten großen Gletscherständen (Hochständen) in historischer Zeit. Die für einzelne Gletschersysteme vorgeschlagenen früh- und mittelholozänen Maximalstände (z. B. Patzelt und Bortenschlager, 1973; Kerschner et al., 2006) konnten bisher nicht an anderen Gletschern verifiziert werden und sind in Diskussion.

Holozäne Minimalstände von Alpengletschern sind nur indirekt abschätzbar. Der Tschierva Gletscher dürfte langanhaltend zumindest 1,2 km hinter die Länge des Jahres 2005 zurückgeschmolzen sein. Das war mit einer gegenüber dem Referenzniveau 1960 bis 1985 um 1,8 °C höheren Sommertemperatur (unter der Annahme heutiger Niederschlagsverhältnisse) verbunden (Jörin et al., 2008). Die Temperaturerhöhung von 1,8 °C ist nur rund 0,5 °C höher als der instrumentell beobachtete Temperaturanstieg (Auer et al., 2007) zwischen den Perioden 1960 bis 1985 und 1990 bis 2010.

Im Gegensatz zu den Ergebnissen für das frühe und mittlere Holozän sind Belege aus den letzten 4 000 Jahren, dem Neoglazial, für geringere Gletscherlängen als um 2000 selten (Hormes et al., 2001; Holzhauser et al., 2005; Jörin et al., 2006). In diesem Zeitraum dominieren die Evidenzen für weitreichende Gletschervorstöße, die schließlich in der sogenannten Kleinen Eiszeit (ca. 1260 bis 1860 n. Chr.) kulminierten (Nicolussi und Patzelt, 2001; Holzhauser et al.,

Abbildung 3.5 Holozäne Proxy-Datensätze beziehungsweise Proxy-basierte Klimarekonstruktionen aus Österreich sowie dem gesamten Alpenraum als auch aus Grönland im Vergleich zu ausgewählten Klimaantrieben. Die Datensätze belegen ein im holozänen Vergleich überdurchschnittlich warmes Früh- und Mittelholozän und eine Temperaturabnahme bis in die letzten Jahrhunderte hinein. Dieser Verlauf folgt prinzipiell der Entwicklung der Sommerinsolation. a) Entwicklung der Insolation im Sommer (Juni-Juli-August) und Winter (Dezember-Jänner-Februar) für 47°N; b) Rekonstruktion der Sonnenaktivität für die letzten 9 000 Jahre (Steinhilber et al., 2009); c) Sauerstoffisotopen-Zeitreihe des NGRIP Eisbohrkerns aus Zentralgrönland (Vinther et al., 2009); d) Simulation der Entwicklung der Juli-Temperatur in Zentraleuropa über die letzten 9000 Jahre bis in vorindustrielle Zeit (Renssen et al., 2009); d) dendro- und ^{14}C-datierte Belege für kürzere alpine Gletscher als gegenwärtig (≈1990 / 2010) (Hormes et al., 2001; Nicolussi und Patzelt, 2001; Jörin et al., 2006, 2008; Drescher-Schneider und Kellerer-Pirklbauer, 2008; Nicolussi, 2009b, 2011; Nicolussi und Schlüchter, 2012); f) nachweisbare Vorstöße des Gepatschferners über eine Größe vergleichbar jener des Jahres 1940 hinaus (Nicolussi und Patzelt, 2001); g) Entwicklung der Höhenlage der Baumgrenze im Kaunertal nach Holzfunden (Nicolussi et al., 2005); h) Zuckmücken-basierte Rekonstruktion der Juli-Temperatur am Hinterburgsee, Schweiz (Heiri et al., 2003); i) Zuckmücken-basierte Rekonstruktion der Juli-Temperatur am Schwarzsee ob Sölden (Ilyashuk et al., 2011); j) Sauerstoffisotopen-Zeitreihe aus Höhlensintern der Spannagel-Höhle (COMNISPA II; Fohlmeister et al., 2013); (k) Seehochstände des Lago di Ledro in den letzten 5 000 Jahren (Magny et al., 2009); (l) Seehochstände im Vorland der NW-Alpen bzw. im Jura (Magny, 2004)

Figure 3.5 Holocene environmental records and proxy-based climate reconstructions from Austria, the Alps and Greenland in comparison with selected climate forcings. a) evolution of insolation during summer (June-July-August) and winter (December-January-February) at 47°N; b) reconstruction of solar variability for the last 9 000 years; c) oxygen-isotope record of the NGRIP ice-core, central Greenland; d) simulation of the temperature evolution in July in central Europe over the last 9000 years until the pre-industrial period ; d) dendrochronologically, i. e. calendar-dated, and ^{14}C-dated evidences for shorter glaciers than today (≈1990 / 2010 AD); f) established advances of the glacier Gepatschferner beyond the glacier's size in 1940 AD; g) tree-line record in the Kauner valley based on finds of wooden remains; h) chironomid-based reconstruction of July temperature from lake Hinterburg, Switzerland; i) chironomid-based reconstruction of July temperature from Schwarzsee ob Sölden; j) oxygen-isotope record of speleothems from the Spannagel cave; (k) lake-level high-stands of Lago di Ledro during the last 5 000 years; (l) lake-level high-stands in the foreland of the NW-Alps and the Jura (Magny, 2004)

2005). In dieser Periode erreichten die meisten Alpengletscher ihre Maximalausdehnung innerhalb der letzten etwa 11 000 Jahre. Bereits früh im Neoglazial, um 3 500 Jahre vor heute, erreichten manche Alpengletscher den späteren Maximalständen vergleichbare Ausmaße (Renner, 1982; Schimmelpfennig et al., 2012).

Die auf Holzfunden beruhende Rekonstruktion der Baumgrenzhöhe (Abbildung 3.5 g) im zentralalpinen Kaunertal belegt maximale Werte im frühen und mittleren Holozän (Nicolussi et al., 2005; Nicolussi, 2009b). Ab 6 400 Jahren vor heute zeigt sich für diesen Indikator der sommerlichen Temperaturverhältnisse ein Trend zu geringeren Maxima. Ab rund 4 000 Jahren vor heute besteht eine Variabilität auf niedrigem Niveau. Für den letztgenannten Zeitraum sind auch anthropogene Störungen im Waldgrenzbereich anzunehmen.

Verlauf und Ausmaß der Baumgrenzentwicklung im ostalpinen Kaunertal stimmt mit westalpinen Rekonstruktionen weitgehend überein (Reasoner und Tinner, 2008). Die auf der Analyse von Zuckmücken(Chironomiden)-Populationen beruhenden Rekonstruktionen der Juli-Temperatur (Heiri et al., 2003; Ilyashuk et al., 2011) stimmen bezüglich des holozänen Trends überein, divergieren hingegen bezüglich dessen Amplitude (Abbildung 3.5 h, i). Die Schwarzsee-Rekonstruktion weist einerseits für das frühe Holozän extrem hohe Werte auf (erklärbar durch eine überproportionale Förderung wärmeliebender Zuckmücken-Arten durch ein trockenes und warmes Klima), zeigt andererseits für das Neoglazial unrealistisch wenig Temperaturvariabilität. Beides ist bedingt durch den Kalibrationsdatensatz (der See ist höher gelegen als die meisten Seen im angewandten Kalibrationsdatensatz; Ilyashuk et al., 2011). Die Isotopen-Zeitreihe von Höhlensintern aus der zentralalpinen Spannagelhöhle korreliert zumindest im jüngsten Abschnitt mit Wintertemperatur-Reihen (Mangini et al., 2005) bzw. NAO-Zeitreihen (Trouet et al., 2009).

Holozäner Temperaturtrend und Klimaantriebe

Die temperaturgesteuerten bzw. -beeinflussten Proxy-Zeitreihen (Abbildung 3.5 e–j) zeigen als übereinstimmendes Merkmal einen negativen Trend vom frühen / mittleren Holozän bis in die vorindustrielle Zeit. Sie stimmen generell mit den Ergebnissen von anderen Temperatur-sensitiven Proxy-Zeitreihen überein (Davis et al., 2003; Jansen et al., 2007; Wanner et al., 2008) wie beispielsweise mit dem Langfristtrend der $\delta^{18}O$ Reihen grönländischer Eiskerne (Abbildung 3.5 c). Ebenso zeigen Simulationen für Mitteleuropa ein langfristiges Maximum der Juli-Temperatur um 7 000 Jahre vor heute mit einer daran anschließenden, bis in die vorindustrielle Zeit andauernden Abkühlung (Renssen et al., 2009; Abbildung 3.5 d). Der Betrag der modellierten Abkühlung liegt dabei bei 2 °C für Juli (Renssen et al., 2009) bzw. rund 3 °C für den wärmsten Monat (Renssen et al., 2012). Diese Simulationsergebnisse entsprechen weitgehend den aus Baumgrenz- (Nicolussi et al., 2005; Reasoner und Tinner 2008; Abbildung 3.5 g) und Gletscherdaten (Jörin et al., 2008) für die letzten 7 000 Jahre abschätzbaren sowie rekonstruierten Temperaturänderungen bzw. übertreffen die alpinen Proxy- Ergebnisse etwas. Unbestrittene Erklärung für den holozänen Abkühlungstrend ab dem früh- bis mittelholozänen Maximum ist die langfristige Abnahme der sommerlichen Insolation auf der Nordhemisphäre, verursacht durch die orbitale Variabilität (Jansen et al., 2007; Wanner et al., 2008; Abbildung 3.5 a).

Demgegenüber zeigt ein anderer, vieldiskutierter Klimaantrieb, die Sonnenaktivität, keinen entsprechenden langfristigen Trend (Steinhilber et al., 2009, 2012). Im mittelfristigen Zeitskalenbereich von mehreren Jahrzehnten bis Jahrhunderten kann dieser Klimaantrieb jedoch sehr wohl Effekte haben (Luterbacher et al., 2001; Mangini et al., 2005; Büntgen et al., 2006; Nicolussi et al., 2009; Nussbaumer et al., 2011). Phasen geringer Sonnenaktivität gingen auch im Alpenraum mit teilweise nachweisbar kühleren Bedingungen einher. Belegbar ist dies anhand der zeitlichen Synchronität von Sonnenaktivität und Baumgrenzvariabilität sowie Bestandesdichte im Hochlagenbereich im Zeitraum um 5 500 Jahre vor heute (Nicolussi et al, 2005; Nicolussi, 2009b), sowie auch anhand von mehrfach belegten Gletschervorstößen während der früheisenzeitlichen Sonneninaktivitätsphase (Nicolussi und Patzelt, 2001; Holzhauser et al., 2005). Auch alpine Höhlensinter-Isotopenwerte zeigen eine auffällige Korrelation mit solaren Schwankungen auf einer Zeitskala von Jahrzehnten bis Jahrhunderten (Mangini et al., 2005).

Die mittel- bis langfristige Klimaentwicklung in Österreich während des Holozäns ist als Ausschnitt gesamthemisphärischer Abläufe und hier speziell jener des nordatlantischen Sektors, zu verstehen. Dies zeigt sich nicht nur im generellen Verlauf der Klimaentwicklung sondern auch bezüglich markanter Ereignisse. Das in grönländischen Eisbohrkernen drastisch abgebildete Abkühlungsereignis vor ca. 8 200 Jahren (Alley und Ágústsdóttir, 2005) ist in Österreich über ein markantes Absinken der zentralalpinen Baumgrenze (Abbildung 3.5 g), negative Anomalien in $\delta^{18}O$-Zeitreihen von Höhlensintern (Boch et al., 2009) und Veränderungen der Zuckmücken-Populationen (Abbildung 3.5 i) klar nachweisbar.

Ein Vergleich des heutigen Temperaturniveaus (≈ Mittel der Jahre 1990 bis 2010) mit holozänen Verhältnissen ist we-

gen des derzeitigen schnellen Wandels nur begrenzt möglich, da Proxy-Zeiger mehrerer wichtiger Klimaarchive nur mit längeren Anpassungszeiten reagieren. Dies gilt etwa für die Adaption der Baumgrenzhöhe, die zumindest einiger Jahrzehnte bedarf. Aber auch die alpinen Gletscher sind bezüglich ihrer Ausdehnung und Länge nicht an die gegenwärtig herrschende Klimasituation angepasst, wie der anhaltend starke Rückzug der letzten Jahre zeigt, der teilweise Eiszerfallsformen annimmt. Ein Vergleich von rezenten und holozänen Verhältnissen wird auch dadurch erschwert, dass manche Proxy-Datensätze bereits um das Jahr 2000 enden und daher den aktuellen Wandel nicht gänzlich erfassen. Der Temperaturanstieg in Österreich bzw. im Alpenraum seit der Kleinen Eiszeit (ca. 1260 bis 1860 n. Chr.) lässt sich anhand instrumenteller Daten sowie präziser Klimaproxies auf rund 2 °C festlegen. Dieser Wert entspricht annähernd der mit Proxy- und Simulationsdaten abgeschätzten Abkühlung seit dem früh- bis mittelholozänen thermischen Maximum von vor etwa 7 000 Jahren bis in die vorindustrielle Zeit. Das Sommertemperaturniveau der letzten beiden Jahrzehnte dürfte weitgehend, wenn auch nicht gänzlich, die langfristigen, d. h. mehrdekadischen bis mehrhundertjährigen thermischen Temperaturmittel des (frühen und mittleren) Holozäns erreicht haben. Anzunehmen ist allerdings, dass die dekadischen Temperaturmaxima des Holozäns über jenen der vergangenen Jahrzehnte lagen. Zudem sind holozäne Temperaturvergleiche weitgehend auf die Sommersaison bezogen, die Entwicklung der winterlichen Temperaturverhältnisse ist im Detail nicht geklärt.

Niederschlagsentwicklung

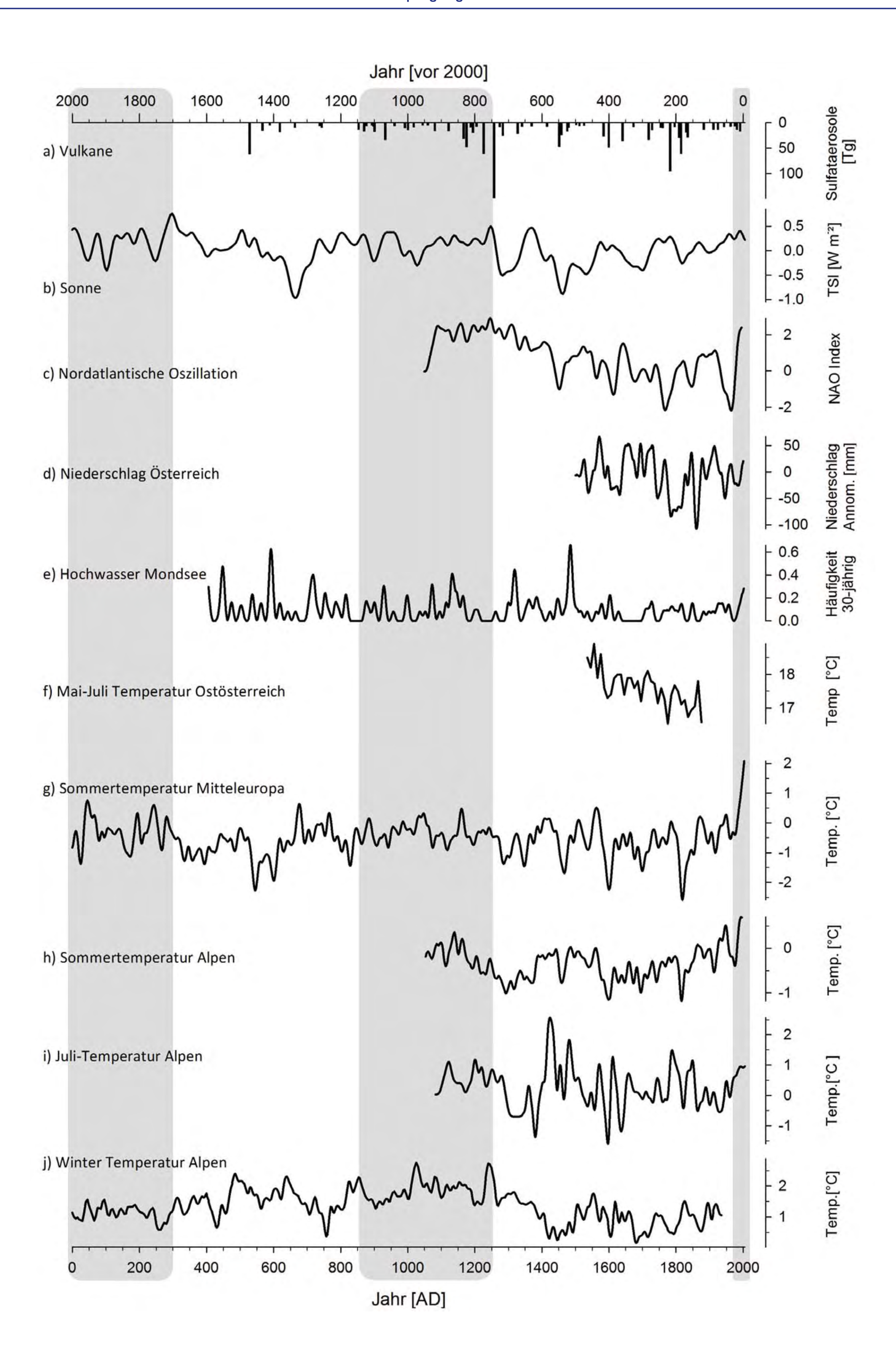
Die holozäne Variabilität des Niederschlags im Großraum der Alpen lässt keine langfristigen Trends erkennen. Durch Bestimmung von Seehochständen (z. B. Magny, 2004) beziehungsweise Analysen an Seesedimenten, die während Hochwasserereignissen abgelagert wurden (z. B. Debret et al., 2010; Lauterbach et al., 2012), kann vielmehr ein Wechsel zwischen – unterschiedlich lange andauernden – Perioden mit vermehrtem bzw. reduziertem Niederschlag geschlossen werden. Die für verschiedene Seen des Jura und des Vorlandes der nordwestlichen Alpen (Abbildung 3.5 l) bzw. der Südalpen (Abbildung 3.5 k) erarbeiteten Datensätze lassen prinzipiell ähnliche Perioden erkennen (Lauterbach et al., 2012). Hochwässer traten dabei vermehrt in Perioden geringer Sonnenaktivität (Abbildung 3.5 b) und vergleichsweise kühler Temperaturen auf (Magny, 2004; Czymzik et al., 2010; Debret et al., 2010; Lauterbach et al., 2012). Große Aufschüttungsereignisse an inneralpinen Murkegeln lassen jedoch auch für die dem holozänen thermischen Maximum zurechenbare Periode um 7 500 Jahre vor heute Starkniederschlagsereignisse als Folge verstärkten Anströmens feuchter Luftmassen aus dem Mittelmeerraum ableiten (Patzelt, 1987; Spötl et al., 2010). Die Analyse des Auftretens und der Frequenz von Lawinenereignissen im Zeitraum der letzten etwa 9 000 Jahre im zentralalpinen Zillertal lässt für klimatisch günstige Phasen eine relative Abnahme der Lawinentätigkeit und damit auch entsprechend seltenere Schneeniederschlagsereignisse annehmen (Nicolussi et al., 2007; Zrost et al., 2007; Luzian et al., 2001).

3.2.4 Klima der letzten zwei Jahrtausende

Für die Rekonstruktion der Klimaänderungen der letzten 2 000 Jahre lassen sich neben natürlichen Klimaarchiven wie Gletschern, Jahrringen, Seesedimenten und Höhlensinter (z. B. Nicolussi und Patzelt, 2001; Holzhauser et al., 2005; Mangini et al., 2005; Larocque-Tobler et al., 2010; Büntgen et al., 2011; Trachsel et al., 2012) zumindest für das vergangene Jahrtausend auch geschriebene Aufzeichnungen als klimageschichtliche Quelle nutzen und entsprechend auswerten (z. B. Strömmer, 2003; Rohr, 2006a, b; Pfister, 2010; Maurer et al., 2009, 2011). Ab etwa der Mitte des 18. Jahrhunderts stehen auch zunehmend Messdaten zu Verfügung (z. B. zu Temperatur, Niederschlag, Luftdruck etc.; Efthymiadis et al., 2006; Auer et al., 2007; Chimani et al., 2012; siehe Abschnitt instrumentelle Periode). Dieser Reichtum an Quellen ermöglicht eine umfassendere Klimarekonstruktion als für ältere Zeiträume.

Die Auflösung und Datierung dieser relativ jungen Zeitreihen ist so gut, dass man direkte Vergleiche mit verschiedenen klimasteuernden Parametern anstellen kann: So mit der Sonnenaktivität, deren Minima sich in fast allen Archiven als kältere Perioden widerspiegeln (Breitenmoser et al., 2012; Martin-Puertas et al., 2012); mit Vulkanausbrüchen, die in Abhängigkeit von emittiertem Staub und Gasen zu starken Abkühlungen führten (Wanner et al., 2008); oder mit Treibhausgasen (Wanner et al., 2008, Fig. 10 und die dort angegebenen Quellen), die eine wichtige Rolle für die deutliche Erwärmung seit den 1980er Jahren spielen. Hinzu kommen Änderungen in der Nordatlantischen Oszillation (z. B. Trouet et al., 2009), mit der ein Wechsel im Niederschlagsangebot einhergehen kann (z. B. Wilhelm et al., 2012). Daraus ergibt sich ein Bild, das durch viele steuernde Kräfte geprägt ist, die sich oft überlagern.

Für die letzten zweitausend Jahre ist international eine klimageschichtliche Periodisierung etabliert (Wanner, 2007; Wanner et al., 2008), die auch auf Befunden aus Mitteleuropa bzw. dem Alpenraum beruht und deren Periodenbezeichnun-



Jahr [vor 2000]
2000
1800
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
a) Vulkane
Sulfataerosole [Tg]
0
50
100
b) Sonne
TSI [W m⁻²]
0.5
0.0
-0.5
-1.0
c) Nordatlantische Oszillation
NAO Index
2
0
-2
d) Niederschlag Österreich
Niederschlag Annom. [mm]
50
0
-50
-100
e) Hochwasser Mondsee
Häufigkeit 30-jährig
0.6
0.4
0.2
0.0
f) Mai-Juli Temperatur Ostösterreich
Temp [°C]
18
17
g) Sommertemperatur Mitteleuropa
Temp. [°C]
2
1
0
-1
-2
h) Sommertemperatur Alpen
Temp. [°C]
0
-1
i) Juli-Temperatur Alpen
Temp.[°C]
2
1
0
-1
j) Winter Temperatur Alpen
Temp.[°C]
2
1
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
Jahr [AD]

gen das vorherrschende Klima charakterisieren: die römische Warmzeit (Roman Warm Period, RWP), die Kälteperiode der ausgehenden Römerzeit und des frühen Mittelalters (Dark Ages Cold Period, DACP), die mittelalterliche Warmzeit (Medieval Warm Period, MWP oder auch Medieval Climate Anomaly, MCA), die Kleine Eiszeit (Little Ice Age, LIA) sowie die moderne oder rezente globale Erwärmung. Wir orientieren uns für die zeitliche Abgrenzung dieser Perioden, die sich in Diskussion befindet, an der alpinen Gletscherentwicklung und gehen im folgenden Abschnitt auf die Klimarekonstruktionen für Österreich bzw. den Alpenraum ein.

Die römische Warmzeit (RWP, von ca. 250 v. Chr. bis 300 n. Chr.)

In der zweiten Hälfte dieses Abschnittes, in den ersten Jahrhunderten nach Christus, herrschten zwar im Vergleich zum frühen und mittleren Holozän niedrigere Temperaturen vor (siehe Abschnitt Holozän), aber in Relation zu den folgenden Jahrhunderten war das Klima stabil, mild und nicht zu trocken (Büntgen et al., 2011). Für Österreich gibt es zu diesem Zeitraum zwei hochaufgelöste Klimarekonstruktionen, die in Abbildung 3.6 gezeigt werden: Einerseits für Sommertemperaturen (Abbildung 3.6 g), die aus überwiegend österreichischen Jahrringdaten rekonstruiert wurden (Nicolussi et al., 2009; Büntgen et al., 2011), andererseits für Wintertemperaturen (Abbildung 3.6 j), die aus den Sauerstoffisotopen eines Höhlensinters (auch Tropfstein oder Speläothem) abgeleitet wurden (Mangini et al., 2005). Die Jahre 1 bis 300 n. Chr. wiesen relativ warme Sommer auf, während die Winter etwas kühler als der Durchschnitt der letzten 2000 Jahre blieben. Für die Alpengletscher ist eine mehrere Jahrhunderte andauernde Rückzugsperiode mit ähnlich geringer Gletscherausdehnung wie im späten 20. Jahrhundert belegt (Holzhauser et al., 2005; Jörin et al., 2006). Die Sonnenstrahlung war in diesem Zeitraum überdurchschnittlich hoch (Abbildung 3.6 b).

Die Kälteperiode der ausgehenden Römerzeit und des frühen Mittelalters (DACP, von ca. 300 bis 840 n. Chr.)

Um ca. 300 n. Chr. begann eine Periode mit deutlich instabileren klimatischen Verhältnissen und auffallend geringeren Temperaturen: Die Sommertemperaturen sanken zwischen 300 und 450 n. Chr. deutlich und lagen von 550 bis 600 n. Chr. durchschnittlich ca. 0,8 °C unter dem Mittel des 20. Jahrhunderts (Abbildung 3.6 g). Gleichzeitig wurde es feuchter (Büntgen et al., 2011). In den Sedimenten des Mondsees ha-

Abbildung 3.6 Klimasteuernde Parameter und Klimarekonstruktionen der letzten 2000 Jahre für den österreichischen Raum und die Ostalpen. Alle Datensätze sind über einen Zeitraum von 30 Jahren mit einem Gauß Lowpass Filter geglättet, mit Ausnahme der Daten in Abbildung 3.6 a. Grau hinterlegt sind generell wärmere Perioden. a) Rekonstruierter Sulfateintrag in die nördliche Hemisphäre durch große Vulkanausbrüche abgeleitet aus Sulfatablagerungen in arktischem Eis (Gao et al., 2008); b) Sonnenaktivität nach rezenten Messungen (1951 bis 2004) und rekonstruiert mit ^{10}Be-Datensätzen aus Eisbohrkernen Grönlands und der Antarktis (Steinhilber et al., 2009), TSI = total solar irradiance (Gesamtstrahlungsintensität der Sonne); c) Entwicklung der Nordatlantischen Oszillation (NAO) in den letzten rund 950 Jahren als Maß für dominant zonale (hohe Werte) bzw. meridionale (niedere Werte) Zirkulationsverhältnisse in Mitteleuropa, rekonstruiert mittels Höhlensinter-Daten aus Schottland und Jahrring-Daten aus Marokko (Trouet et al., 2009); d) Entwicklung des Jahresniederschlags in Österreich seit dem Jahr 1500 nach Messdaten der instrumentellen Periode und rekonstruiert mittels historischer Dokumente (Casty et al., 2005), Anom. = Anomalie; e) Anzahl von Jahren mit Hochwasser am Mondsee innerhalb eines 30jährigen Zeitfensters (Swierczynski et al., 2012); f) Mai-Juni-Juli Temperatur rekonstruiert aus den Weinernte-Terminen in der Umgebung von Wien und Klosterneuburg (Maurer et al., 2009); g) Sommertemperatur (Juni-Juli-August) in Mitteleuropa rekonstruiert anhand alpiner Jahrringdaten aus Österreich (Büntgen et al., 2011); h) Sommertemperatur (Juni-Juli-August) in den Alpen rekonstruiert anhand verschiedener Jahrring-Proxys aus den Alpen und Zuckmücken-Kopfkapseln (Chironomiden-Kopfkapseln) aus dem Silvaplana See (Trachsel et al., 2012); i) Julitemperatur rekonstruiert mit Zuckmücken-Kopfkapseln aus den Sedimenten des Seeberg Sees (Larocque-Tobler et al., 2012); j) Wintertemperatur in den Zentralalpen rekonstruiert auf Basis von Sauerstoffisotopen-Messungen an Höhlensintern aus der Spannagel Höhle (Mangini et al., 2005)

Figure 3.6 Climate influencing parameters and climate reconstructions for the last 2000 years available for Austria and the Eastern Alps. All data were smoothed over a 30 year period with a Gauss lowpass filter, with the exception of the data in Fig. 1a. Generally warmer periods are shaded grey. a) Sulphate deposition in the northern hemisphere originating from volcanoes, reconstructed from arctic ice cores (Gao et al., 2008); b) Solar activity based on recent measurements (1951–2004), and reconstructions from ^{10}Be-trends observed in ice cores from Greenland and the Antarctic (Steinhilber et al. 2009), TSI = total solar irradiance; c) North Atlantic oscillation trends over the last 950 years as indicator for zonal (high values) and meridional (low values) circulation patterns in middle Europe, reconstructed from Scottish speleothems and Moroccan tree-ring data (Trouet et al., 2009); d) Precipitation trends for Austria since 1500 AD, based on instrumental records or reconstructed from historical documents (Casty et al., 2005), Anom. = anomaly; e) Frequency of years with floodings within a 30 year period in the Mondsee region (Swierczynski et al., 2012); f) May-June-July temperature reconstructed from Viennese and Klosterneuburg grape harvest dates (Maurer et al. 2009); g) Central European summer temperature (June-July-August) reconstructed with Alpine tree-ring data originating from Austria (Büntgen et al., 2011); h) Alpine summer temperature (June-July-August) reconstructed with Alpine tree-ring proxies and chironomid head capsules from lake Silvaplana (Trachsel et al., 2012); i) July temperature reconstructed with chironomid head capsules from the lake sediment of Seeberg See (Larocque-Tobler et al., 2012); j) winter temperature in the Central Alps reconstructed with oxygen isotopes form speleothems of the Spannagel cave (Mangini et al., 2005)

ben Hochwässer häufiger ihre Spuren hinterlassen, vor allem zwischen 450 und 480 n. Chr., 590 und 640 n. Chr. sowie 700 und 750 n. Chr. (Swierczynski et al., 2012 und Abbildung 3.6 e). Zwischen den Jahren 700 und 750 traten daraufhin auch in den Westalpen mehr Hochwässer auf (Wilhelm et al., 2012). Die Wintertemperaturen (Abbildung 3.6 j) lagen zuerst im Durchschnitt (300 bis 400 n. Chr.), sanken danach rapide, um dann zwischen 475 und 500 n. Chr. deutlich über den Durchschnitt anzusteigen, jedoch in der Phase mit den kältesten Sommertemperaturen (um 540 n. Chr) wieder abzunehmen. Das markante Sommertemperaturminimum um 540 n. Chr. wurde durch einen klimabeeinflussenden Vulkanausbruch (Abbildung 3.6 a) verursacht (Larsen et al., 2008) und ist mit den niedrigen Temperaturen um das Jahr 1810 vergleichbar. Die niedrigsten Wintertemperaturen wurden um 780 n. Chr. erreicht, also gegen Ende der relativ feuchten und kalten Periode.

Während der Kälteperiode des frühen Mittelalters waren die Gletscher starken Schwankungen ausgesetzt: Bereits um 335 n. Chr. rückte der Gepatschferner über jene Ausdehnung, die vergleichbar mit jener zur Mitte des 20. Jahrhunderts wäre, vor. In der zweiten Hälfte des 6. Jahrhunderts könnte der Aletschgletscher eine ähnlich große Ausdehnung wie in der Kleinen Eiszeit erreicht haben (Holzhauser et al., 2005). Für die Ostalpengletscher sind ähnliche große Ausdehnungen bisher nicht nachweisbar, vielmehr blieben sie hinter den Ausdehnungen wie um das Jahr 1920 zurück (Nicolussi et al., 2006). Das 7. Jahrhundert dürfte von einer Schwundperiode (Jörin et al., 2006) gekennzeichnet gewesen sein. Spätestens Ende des 8. Jahrhunderts rückten die Gletscher wieder vor und erreichten um das Jahr 835 Ausdehnungen, die mit jenen des ausgehenden 19. Jahrhunderts vergleichbar sind (Nicolussi und Patzelt, 2001; Holzhauser et al., 2005; Nicolussi et al., 2006). Die Sonnenstrahlung sank zwischen den Jahren 650 und 670 auf die niedrigsten Werte der letzten 2000 Jahre.

Die Mittelalterliche Warmzeit (MWP, von ca. 840 bis 1260)

Sommertemperaturrekonstruktionen zeigen ab Mitte des 9. Jahrhunderts einen klaren Temperaturanstieg (Abbildung 3.6 g), gefolgt von einem Anstieg der Wintertemperatur ab 950 (Abbildung 3.6 j). Gleichzeitig sank die Hochwasserfrequenz auf ein Minimum (Abbildung 3.6 e). Die Sommertemperaturen entsprachen für das folgende 11. Jahrhundert im Mittel den Werten des 20. Jahrhunderts. Mit Unterbrechungen dauerte diese überwiegend warme Periode bis ca. 1250 an. Auch die kürzeren Zeitreihen (Abbildung 3.6 h–j) beginnen um das Jahr 1000 mit einer sehr warmen Phase (Larocque-Tobler et al., 2012; Trachsel et al., 2012). Hochwasser traten nicht nur in im Raum Mondsee seltener auf, sondern auch in den französischen Alpen (Wilhelm et al., 2012). Diese Periode war aber nicht mit Dürren verbunden, sondern mit eher feuchten Frühsommern (Büntgen et al., 2011). Die Sonnenaktivität lag auf einem relativ hohen Niveau (Abbildung 3.6 b).

Die für den Zeitraum der letzten 2000 Jahre relativ warme Periode ist auch an den Gletschern erkennbar: Ab ca. 840 fehlen Belege für Gletschervorstöße; vielmehr ist ein lang anhaltender Rückzug ableitbar, bis hin zu einem Tiefstand wie in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts. Ein kurzfristiger Wiedervorstoß der Alpengletscher ist jedoch für das 12. Jahrhundert nachweisbar (Nicolussi und Patzelt, 2001; Holzhauser et al., 2005).

Die Kleine Eiszeit (LIA, von ca. 1260 bis 1860)

Die als Kleine Eiszeit bezeichnete Klimaperiode, die durch Gletschervorstöße charakterisiert ist, lässt sich für den Alpenraum auf den Zeitraum von etwa 1260 bis 1860 eingrenzen. Ab ca. 1260 zeigen die Klimarekonstruktionen eine markante Abkühlung an (Abbildung 3.6 g–j), die sich auch in einem Anwachsen der Alpengletscher manifestierte. Für Westalpengletscher lassen sich um ca. 1380 ähnlich starke Ausdehnungen wie im 19. Jahrhundert nachweisen, während in den Ostalpen das Eis nur die Ausmaße wie im späten 19. Jahrhundert erreichte und damit hinter den Maxima von ca. 1860 zurückblieb (Nicolussi und Patzelt, 2001). Die Sommertemperaturen lagen in der Periode 1260 bis 1380 im Durchschnitt auf dem Niveau des 19. Jahrhunderts.

Auf eine kurze Periode mit höheren Sommertemperaturen und Gletscherrückzug um das Jahr 1400 folgte kurz nach 1450 ein Jahrzehnte andauernder Kälterückschlag, an den sich bis etwa in die Mitte des 16. Jahrhunderts wiederum etwas wärmere Bedingungen anschlossen. Im ausgehenden 16. Jahrhundert begann die Hauptphase der Kleinen Eiszeit, die durch eine Serie von Gletschervorstößen, die im gesamten Alpenraum nachweisbaren sind, gekennzeichnet war. Auch im Kontext der letzten 11000 Jahre betrachtet erreichten die meisten Alpengletscher in diesen rund 250 Jahren ihre maximale Ausdehnung. Der dann um 1860 einsetzende Eisrückgang hält mit wenigen Unterbrechungen bis heute an.

Auch für die Kleine Eiszeit waren instabile Klimabedingungen typisch, d. h. wärmere und kühlere Phasen wechselten sich ab, wobei die Schwankungen in dieser Periode jedoch auf einem niedrigen Niveau erfolgten. Die kältesten Win-

tertemperaturen werden für die Zeiträume 1400 bis 1500, 1600 bis 1620, 1680 bis 1750 und die niedrigsten Sommertemperaturen für 1450 bis 1500, 1590 bis 1610, rund um das Jahr 1700 sowie 1800 bis 1850 rekonstruiert (Abbildung 3.6 g/j; Mangini et al., 2005; Büntgen et al., 2011). Auch die Unterschiede in den Weinernteerträge dokumentieren kältere Bedingungen zwischen 1600 und 1940, mit den ungünstigsten (tiefsten) Temperaturen zwischen 1771 und 1780 (Maurer et al., 2009; Maurer et al., 2011). Die Hochwasserhäufigkeit war während der Kleinen Eiszeit variabel (Glaser et al., 2010; Swierczynski et al., 2012) mit einer sehr geringen Frequenz zwischen 1600 und 1700; also ohne erkennbaren Zusammenhang mit den gleichzeitig deutlichen Temperaturschwankungen.

Der erste Abschnitt der Kleinen Eiszeit fiel mit Sonnenaktivitätsminima zusammen (Abbildung 3.6 b; Wolf Minimum: von 1280 bis 1350), gefolgt von weiteren Aktivitäts- und Einstrahlungsminima (Spörer: 1460 bis 1550, Maunder: 1645 bis 1715 und Dalton: 1790 bis 1830). Gleichzeitig wirkten sich einige Vulkanausbrüche durch die starke Emission von Sulfat-Aerosolen auf das Klima aus. Gut dokumentiert ist Tambora (im Jahr 1815), der 1816 ein „Jahr ohne Sommer“ verursachte (Stommel und Stommel, 1983). Aber auch zu Beginn und in weiteren Abschnitten der Kleinen Eiszeit gab es nicht nur starke sondern im holozänen Kontext auch viele Vulkanausbrüche, die große Mengen an Sulfat-Aerosolen ausstießen (Gao et al., 2008; Abbildung 3.6 a) und dadurch besonders klimawirksam waren (Wanner et al., 2008).

Übergang zur rezenten oder modernen Erwärmung

Der Temperaturanstieg nach der Kleinen Eiszeit blieb bis zum Anfang der 1980er Jahre im Rahmen der Schwankungen der letzten 2 000 Jahre. Die moderne Erwärmung, oft auch als globale Erwärmung bezeichnet, umfasst den Zeitraum der letzten 20–30 Jahre, für die ein rascher, überdurchschnittlich starker, überregionaler Temperaturanstieg messbar ist (vgl. Abschnitt instrumentelle Messungen). Konsequenz – und für alle aufmerksamen Beobachter wohl augenfälliger natürlicher Beleg der markanten Erwärmung der letzten drei Jahrzehnte – ist der Rückzug der alpinen Gletscher. Das gegenwärtige Abschmelzen setzte nach einem kleinen Wiedervorstoß mit Höhepunkt um 1980 ein und beschleunigt sich heute tendenziell sogar. Das Ausapern des 5 300 Jahre alten Tiroler Eismannes (Ötzi, z. B. Oeggl, 2009) sowie von Baumstämmen aus dem frühen und mittleren Holozän (siehe vorhergehendes Abschnitt 3.2.3 und Nicolussi et al., 2005) ist Folge dieses Eisrückganges und verdeutlicht die im Kontext der letzten 2 000 Jahre derzeit außerordentliche klimatische Situation.

Die meisten Klimarekonstruktionen, die in Abbildung 3.6 gezeigt werden, enden zwischen dem Jahr 1996 und 2000. Sie erfassen also nur den Beginn der modernen Erwärmung und nicht deren Andauern bis heute. Nur zwei Datensätze (Abbildung 3.6 g, 1, i) beinhalten den Rekordsommer 2003 (Luterbacher et al., 2004). Trotzdem ist in allen Proxy-Datensätzen ein Temperaturanstieg in den letzten Jahrzehnten erkennbar.

3.2.5 Instrumentelle Periode – Trends der letzten 130 bis 250 Jahre

Die folgenden Abschnitte 3.2.5 und 3.2.6 stützen sich auf peer-reviewte Literatur, die auf homogenisierten Datensätzen beruhen und möglichst Aussagen für den gesamtösterreichischen Raum erlauben. Das bedeutet, dass nicht die gesamte für Österreich zur Verfügung stehende Literatur verwendet wurde.

Die langfristige Klimaentwicklung in der instrumentellen Periode mit direkten systematischen Messungen kann in Österreich und in Mitteleuropa für einige Klimaelemente zurück bis in die zweite Hälfte des 18. Jahrhunderts zurück verfolgt werden (vgl. Abschnitt 3.1.2 und 3.1.3). Das erlaubt bereits ein vergleichsweise tiefes Vordringen in früh- bzw. vorindustrielle Zeiten, vor allem was den Aspekt des menschlichen Einflusses auf das Klima betrifft und vor allem im Vergleich zur Klimaentwicklung in globaler Abdeckung, die maximal zurück bis Mitte des 19. Jahrhunderts gegeben ist (Jones et al., 2012). Deshalb ist es im Alpenraum möglich, die aktuellen Entwicklungen in den Kontext von rund zweieinhalb Jahrhunderten zu stellen – ein Vorteil im Hinblick auf die statistische Signifikanz, die Unterscheidung zwischen hochfrequenter Variabilität, mittelfristigen (dekadischen) Anomalien und langfristigen (säkularen) Trends. Gegenüber den vorangestellten Paläoklima-Abschnitten sind in den „instrumentellen Jahrhunderten“, eine höhere räumliche Auflösung, eine vollständige jahreszeitliche Abdeckung und das Vorliegen mehrerer Klimaelemente gegeben.

Basierend auf HISTALP Zeitreihen konnten Böhm et al. (2012), Matulla et al. (2005) bzw. Auer et al. (2007) zeigen, dass zur Beschreibung der hochfrequenten (interannuellen) Klimavariabilität generell eine Unterteilung des Großraums Alpen in vier horizontale und eine vertikale Subregion genügt – mit nur geringfügigen Variationen der Unterteilung für die unterschiedlichen Klimaelemente. Die HISTALP Messnetzkarte in Abbildung 3.1 zeigt diese Subregionen, die sich als Kompromiss aus elementspezifischen PCA-Analysen ergaben

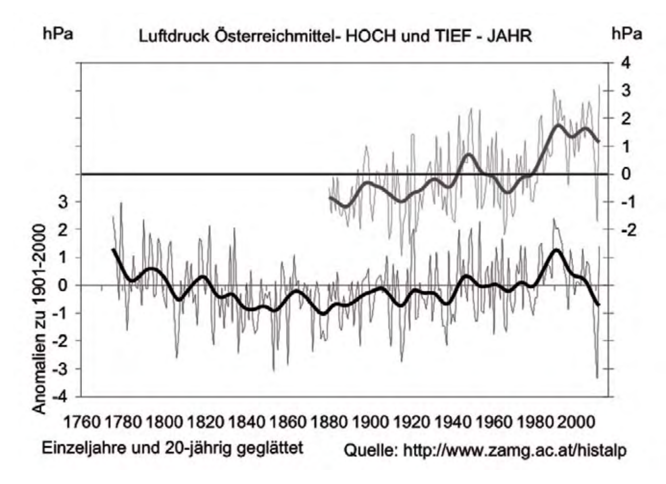


Abbildung 3.7 Anomalien der Jahresmittel des Luftdrucks zum Mittel des 20. Jahrhunderts für die Region Österreich-TIEF (unten, 1775 bis 2011) und Österreich-HOCH (oben, 1880 bis 2011). Einzeljahre und 20-jährig geglättet (Gauß'scher Tiefpass), Grafik: Böhm (2012), erstellt aus HISTALP-Daten (http://www.zamg.ac.at/histalp)

Figure 3.7 Annual air pressure anomalies relative to the mean of the 20th century for the region Austria-LOW (bottom, 1775–2011) and Austria-HIGH (top, 1880–2011), single years and smoothed by 20 yrs. Gauss low pass filtering. Copyright R. Böhm, 2012, source HISTALP (http://www.zamg.ac.at/histalp)

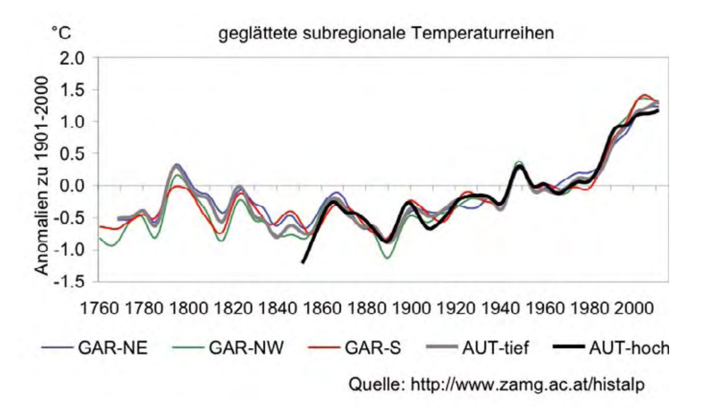


Abbildung 3.8 Anomalien der geglätteten Jahresmittel der Lufttemperatur zum Mittel des 20. Jahrhunderts für verschiedene Subregionen des Großraums Alpen. 20-jährig geglättet (Gauß'scher Tiefpass), Zeitreihen alle aktualisiert bis 2011, Beginn unterschiedlich bis zurück zum Jahr 1760. Grafik: Böhm (2012), erstellt aus HISTALP Daten

Figure 3.8 Anomalies of smoothed (20 yrs. Gaussian low pass filter) annual temperature means relative to the mean of the 20th century for different sub-regions of the Greater Alpine Region. Time series date back until 1760 but with differing starting times and last until 2011. Copyright: Böhm, 2012, source HISTALP

(Auer et al., 2007), um multi-elementare Analysen zu ermöglichen. Für die Beschreibung der dekadischen Variabilität und der Langfristtrends genügen für manche Klimaelemente weniger bis gar keine weiteren Unterteilungen der Region: Die Temperaturtrends sind in der gesamten Region beinahe identisch. Für Luftdruck und Sonnenscheindauer genügt eine Unterteilung in eine Subregion hochalpin (in der Folge mit dem Akronym „hoch" bezeichnet) sowie eine der Täler, Becken und Ebenen („tief"). Für den Niederschlag wurde eine Unterteilung in West, inneralpin, Nord und Südost gewählt, da dieser signifikante Unterschiede auch in der langfristigen Entwicklungen in diesen Subregionen zeigt. Die dafür errechneten Regionsmittel sind stationsbasiert, die Unterteilung ist durch Inserts in Abbildung 3.12 ersichtlich.

Der Alpenraum im großräumigen Kontext

Efthymiadis et al., (2007) haben die räumliche Korrelation der regionalen bzw. subregionalen HISTALP-Zeitreihen mit dem gesamten Nordatlantisch-Europäischen Raum analysiert. Sie zeigten, dass die Temperaturfelder einander über größere Entfernungen als die Niederschlagsfelder ähneln. Über das Jahr gesehen herrscht im Winter eher eine großräumige Ähnlichkeit vor als im Sommer – sowohl für die Temperatur als auch für den Niederschlag.

Luftdruck

Dem Luftdruck kommt über die durch ihn erzeugten Luftströmungen großer Einfluss auf die regionale Klimaentwicklung zu. Besonders für den Großraum Alpen und für Österreich, die im Übergangsbereich von vier großräumigen Klimazonen liegen, ist dieser Einfluss bedeutend. Ob gerade atlantisch-maritimes, mediterran-maritimes, oder kontinentales (alle drei überformt durch den vertikalen Einfluss der Seehöhe in den Bergen) Wetter / Klima herrscht, entscheidet sich durch die gerade herrschende Anströmrichtung (Advektion). Beispiele sind milde Verhältnisse im Winter und kühle im Sommer, wenn atlantische Luftmassen herangeführt werden, Starkregen im Herbst bei Luft aus dem Adriaraum oder heiße Sommer und strenge Winter, wenn kontinentale Luft aus dem Osten kommt.

Eine Analyse der Zeitreihen des Luftdrucks (wiedergegeben in Abbildung 3.7) zeigt einen sehr langfristigen Anstieg von der Mitte des 19. bis gegen Ende des 20. Jahrhunderts, der allerdings um 1990 von einem abrupten Trendwechsel zu nun wieder fallendem Luftdruck abgelöst worden ist. Die Schwankungen von Jahr zu Jahr (interannuelle Variabilität) sind dominant und übertreffen den langfristigen Trend und dekadische Variationen bei weitem. Aus einem einzelnen heißen / kühlen, trockenen / nassen Sommer / Winter oder auch Jahr lassen sich keine Folgerungen über längerfristige Entwicklungen ableiten.

Für den Zusammenhang von Luftdrucktrends mit der atmosphärischen Zirkulation können nur Zeitreihen von Tieflandstationen herangezogen werden. Die in der Abbildung 3.7 ebenfalls dargestellte aus den alpinen Höhenstationen gemittelte (graue) Zeitreihe wird nämlich zusätzlich durch die Temperatur der unter den Messstationen befindlichen Luftmasse beeinflusst. In der Abbildung manifestiert sich das durch den stärkeren positiven Trend, der durch die eingetretene Erwärmung verursacht worden ist. Daraus ergibt sich eine alternative Analysemöglichkeit der Temperaturtrends und Bestätigung der Erwärmung, allein aus den Luftdrucktrends der hochalpinen Observatorien im Gegensatz zu denen des Tieflandes, ohne Verwendung von thermometrischen Messungen (Böhm et al., 1998, Böhm, 2012).

Die saisonalen (Halbjahrestrends April bis September und Oktober bis März) können im Sommer und im Winter auch gegenläufig sein, so z. B. um 1830 oder um 1930, wobei die hochfrequente Variabilität in der kalten Jahreszeit signifikant höher ist als in der warmen. Diese Charakteristika gelten auch für die Zeitreihen anderer Klimaelemente. Die österreichische Luftdruck Tieflandreihe ähnelt hochgradig jenen nordwestlich und nordöstlich des Alpenbogens. Der Luftdruckanstieg in den Bergen war deutlich stärker als im Tiefland (Abbildung 3.7).

Lufttemperatur

Im Fall der Temperatur sind die dekadische und auch die längerfristige Entwicklung in allen Subregionen des Großraums Alpen und damit auch innerhalb Österreichs so gut wie identisch – auch die hochalpine Subgruppe zeigt denselben Verlauf wie sämtliche Subregionen des Tieflandes vom Rhonedelta bis zur ungarischen Tiefebene (Abbildung 3.8).

Die Temperaturentwicklung der letzten beiden Jahrhunderte verlief ähnlich der des Luftdrucks bis 1990, danach kam es allerdings zu einer abrupten Trendumkehr des Luftdrucks. Die Lufttemperatur hat in der Region nach einer leichten Abkühlung während des 19. Jahrhunderts seit den 1880er Jahren in zwei Schüben um insgesamt rund 2 °C zugenommen. Bis etwa 1950 gab es einen Anstieg um rund 1 °C, wie auch die vorangegangene Abkühlung überwiegend auf natürliche Klimaantriebe und interne Reaktionen des Klimasystems zurückzuführen ist. Die darauf folgende Phase von rund drei Jahrzehnten mit stagnierenden bis abnehmenden Temperaturen war bereits anthropogen überformt, wobei vermutet werden kann, dass die starke Luftverschmutzung über die insgesamt abkühlende Wirkung der Aerosole zunächst noch die ebenfalls bereits in Anstieg begriffenen Treibhausgasemissionen maskiert hat. Der Effekt des „Global Dimmings" wurde im Band 1, Kapitel 1 bereits beschrieben. Der endgültige Durchbruch der anthropogenen Treibhausgase als dominanter Klimaantrieb manifestierte sich in der zweiten Erwärmungsphase des 20. Jahrhunderts, die in den beiden Jahrzehnten von 1980 bis 2000 noch einmal 1 °C betragen hat. Danach stagnierte die Temperatur in Österreich (bei kurzfristiger Betrachtung) auf einem hohen Niveau, das dasjenige der beiden ebenfalls positiven dekadischen Anomalien um 1950 und um 1800 signifikant übertrifft. Die 20-jährig geglätteten Daten zeigen für die Zeit nach 2000 einen deutlich abgeschwächten Anstieg.

Die regionale Temperaturreihe Österreichs (Böhm et al., 2009) besitzt eine deutlich höhere Kurzfristvariabilität als die global gemittelte (Jones et al., 2012), wiedergegeben in Abbildung 3.9 und auch die geglätteten Anomalien und Trends sind in Österreich stärker als im globalen Mittel. Beides ist ein Ausdruck dessen, dass es von Region zu Region unterschiedliche Klimaanomalien und Trends gibt, was bei der Mittelung über alle diese Regionen zu einer Dämpfung sowohl der interannuellen Variabilität als auch der dekadischen Anomalien und der Langfristtrends führt. Die besonders starke negative dekadische Anomalie von 1870 bis 1900 und die besonders starke positive der aktuellen drei Jahrzehnte führte insgesamt zu einem in Österreich (und auch im gesamten Großraum Alpen) etwa doppelt so starken Temperaturanstieg wie im globalen Mittel.

Auch bei der Lufttemperatur verlief die saisonale Klimaentwicklung nicht immer parallel zu der des Jahresmittels, dennoch kam es in allen Jahreszeiten zu einer Erwärmung seit der Mitte des 19. Jahrhunderts. Im Herbst gab es im Vergleich zu den anderen drei Jahreszeiten die geringste Erwärmung. Über Jahrzehnte hindurch gab es sogar gegenläufige Entwicklungen, wie etwa die besonders milden Winter der 1910er Jahre, die durch besonders kühle Sommer konterkariert waren. Es war dies eine eher ozeanisch dominierte Phase: kühle Sommer, milde Winter und hohe Niederschläge trugen damals zu der vorletzten markanten Gletschervorstoßphase in den Alpen bei, deren Moränen überall in den vergletscherten Hochregionen zu sehen sind (Böhm et al., 2007). Näheres dazu findet sich in Band 2.

Die Temperaturdifferenz Sommer minus Winter (bzw. wärmster minus kältester Monat) ist ein in der Klimatologie oft verwendetes Maß für die thermische Kontinentalität des Klimas. Die Berechnung der Differenzen zeigten, dass das Klima des 19. Jahrhunderts in der Region kontinentaler geprägt war als im 20. Jahrhundert (Böhm et al., 2009). Mit dem 19. Jahrhundert vergleichbar hohe Kontinentalität gab es im 20. Jahrhundert lediglich für kurze Zeit in den 1940er Jahren. Die bereits erwähnte ozeanisch geprägte Phase der 1910er Jahre hingegen zeigte die geringsten Sommer-Winter Tempe-

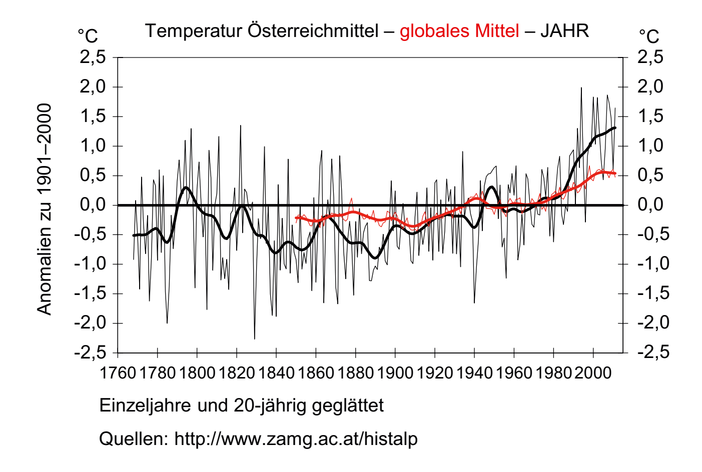


Abbildung 3.9 Anomalien der Jahresmittel der Lufttemperatur zum Mittel des 20. Jahrhunderts für Österreich (1768 bis 2011) und für das globale Mittel (1850 bis 2011). Einzeljahre und 20-jährig geglättet (Gauß'scher Tiefpass). Grafik: Böhm (2012), erstellt aus HISTALP- und CRU-Daten (http://www.cru.uea.ac.uk/data)

Figure 3.9 Anomalies of the annual mean of air temperature for Austria (1768–2011) and the global mean relative to the respective 20th century mean (1850–2011). Single values and smoothed by 20 years Gaussian low pass filter. Copyright R. Böhm, 2012, source HISTALP and CRU (http://www.cru.uea.ac.uk/data)

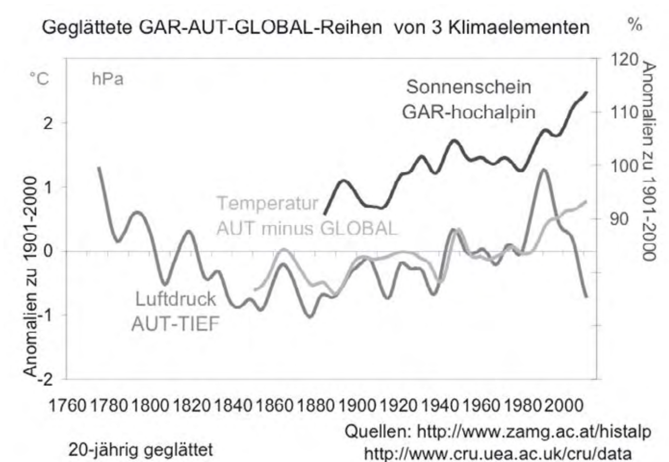


Abbildung 3.10 Abbildung 3.10 Jährliche Anomalien der hochalpinen Sonnenscheindauer (1884 bis 2011), des regionalen Tiefland-Luftdrucks (1775 bis 2011) und der Differenz „Österreich minus global" der Temperatur (1850 bis 2011) zum Mittel des 20. Jahrhunderts. 20-jährig geglättet (Gauß'scher Tiefpass), Grafik: Böhm (2012), erstellt aus HISTALP-Daten und Daten der Climatic Research Unit (http://www.cru.uea.ac.uk/data).

Figure 3.10 Figure 3.10 Anomalies of the annual high alpine sunshine duration (1884–2011), of the Austrian low land regional air pressure (1775–2011) and the difference „Austria minus global" air temperature (1850–2011) relative to the mean of the 20th century, smoothed by 20 years Gaussian low-pass filter. Copyright by R. Böhm, 2012, source HISTALP and CRU

raturunterschiede der gesamten instrumentellen Periode der letzten 250 Jahre.

Interessant ist auch das saisonale Verhalten des Temperaturverlaufs in den aktuellen drei Jahrzehnten mit Unterschieden zwischen unverminderten (Frühling) bis beinahe unvermindert (Sommer) anhaltenden Erwärmungstrends bis zu schwächerer Erwärmung (im Herbst) bis zu angedeuteter aktueller Rückläufigkeit auf hohem Niveau im Winter. Letztere ist im hochalpinen Bereich noch etwas stärker ausgeprägt als in den Österreich-Gesamtmitteln („Klimanewsletter" auf der ZAMG-Website[16]).

Ein manchmal übersehenes bis vernachlässigtes Problem stellen die saisonal unterschiedlichen Klimaentwicklungen für die Klimarekonstruktion durch indirekte Klimazeugen (Proxies) dar (vergleiche Abschnitte 3.2.1 bis 3.2.4). Viele der Proxies sind lediglich vom Klima von Teilen des Gesamtjahres beeinflusst, bei organischen Proxies wie etwa Baumringen, Pollen, Meereslebewesen u. a. ist es vor allem die aktive Wachstumsperiode der warmen Jahreszeit, die ein Klimasignal erzeugt. Deshalb stellen etwa auf Baumringanalysen basierende Rekonstruktionen nicht den Verlauf der Jahresmittel der Temperatur dar, sondern nur den der Wachstumsperiode. Winterproxies sind seltener, wodurch das Winterklima eher ein Stiefkind der indirekten Klimarekonstruktion darstellt.

Sonnenschein

Die elektromagnetische Strahlungsenergie, die welche die Sonne kontinuierlich abstrahlt, stellt die einzige relevante Energiequelle für das Klimasystem der Erde dar. Vor allem die Bewölkung, aber in geringerem Ausmaß auch die Trübung der Atmosphäre, bewirken regional aber auch global eine deutliche (regional) bis schwache (global) interannuelle-, dekadische- und Langzeitveränderlichkeit dieses Klimaantriebes. Aber nicht nur für das Verständnis der energetischen Grundlage des Klimageschehens ist die Sonnenstrahlung fundamental, auch das was landläufig unter „Schönwetter" bzw. „Schlechtwetter" verstanden wird, ist vor allem durch die An- oder Abwesenheit der direkten Sonneneinstrahlung gekennzeichnet. Lange Qualitätsklimazeitreihen der Sonnenstrahlung gibt es allerdings nicht in vergleichbarer Länge wie die von Temperatur und Luftdruck, vor allem gibt es sie nicht in globaler Abdeckung. Erst seit dem Satellitenzeitalter gibt es kontinuierliche Registrierungen der oberhalb der Erdatmosphäre ankommenden Sonnenenergie. Längere instrumentelle

16 http://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/news/histalp

Zeitreihen liegen regional nur für die Sonnenscheindauer vor und reichen typischerweise bis in die 1880er Jahre zurück. Da die Sonnenscheindauer sehr hoch mit der eingestrahlten Energie („Globalstrahlung") korreliert ist, kann sie nicht nur für die erwähnte Unterscheidung zwischen Schönwetter und Schlechtwetter herangezogen werden, sondern durchaus auch für Überlegungen über den solaren Klimaantrieb. Und nicht zuletzt stellt die Solarenergie eine der wesentlichen erneuerbaren Energiequellen dar.

Den fünf hochalpinen Sonnenscheinreihen kommt eine ausreichend hohe räumliche Repräsentanz zu, sodass generelle Aussagen abgeleitet werden konnten. Die hochalpinen Regionen sind nicht von den lokal differenzierten Stratus- und Nebelfeldern der Täler und Ebenen beeinflusst.

Mit einem dominanten Langzeittrend hat die Sonnenscheindauer um rund 20 % in den beinahe 130 Jahren der „solaren instrumentellen Periode" zugenommen. Das bedeutet in absoluten Zahlen eine Zunahme um mehr als 300 Sonnenscheinstunden pro Jahr. Die Zunahme war im Sommerhalbjahr stärker und im Winterhalbjahr schwächer. Der sommerliche Anstieg ging in zwei Stufen vor sich, mit einem ersten Maximum um 1950, darauffolgenden sonnenscheinärmeren Jahrzehnten bis etwa 1980 und einem seither anhaltenden massiven zweiten „regional brightening". Auch die einzelnen Spitzenjahre traten in jüngster Zeit auf – bei den Jahressummen in den Jahren 2003 und 2011, bei den Sommerhalbjahren 2003 und bei den Winterhalbjahren 1989/90.

Von Beginn (1850) an bis etwa 1990 ist die Ähnlichkeit zwischen der Temperatur- und der Lufdruckkurve ins Auge fallend und auch die hochalpine Sonnenscheinkurve zeichnet vom Beginn (1884) bis zum Ende (2011) die Temperaturdifferenz Österreich-Global beinahe identisch nach (Abbildung 3.10). Das legt folgenden Schluss nahe: Es ist über mehr als ein Jahrhundert hindurch in der Region des südlichen Mitteleuropas zu einer nordwärts Verlagerung des subtropischen Hochdruckgürtels gekommen. Dadurch kam es zu einer analogen deutlichen Zunahme der Sonneneinstrahlung und folglich zu einer zusätzlichen Zunahme der Temperatur, die den an sich gegebenen entsprechenden globalen Hintergrundtrend in der Region beinahe verdoppelt hat.

Seit der Formulierung dieser Hypothese in Auer et al. (2007) sowie Auer et al., (2009) ist allerdings durch die markante Trendumkehr des Luftdrucks um 1990 immer deutlicher geworden, dass hier noch Erklärungsbedarf besteht. Das anhaltend hohe Temperaturniveau trotz wieder fallendem Luftdruck könnte noch als Hinweis auf den nun zunehmend durch den über die langwellige Wärmestrahlung laufenden anthropogenen Treibhauseffekt gedeutet werden. Die weiterhin steigende Sonnenscheindauer bei markant rückläufigem Luftdruck hingegen setzt doch ein deutliches Fragezeichen mit weiterem Forschungsbedarf.

Bewölkung

Das Vorhanden- oder Nichtvorhandensein von Bewölkung ist wegen ihres Einflusses auf die Strahlungsbilanz von großer Bedeutung für das Weltklima. Je nach Art, Menge und Dichte der Bewölkung reduziert sie die direkte Sonneneinstrahlung, erhöht den Anteil der Diffusstrahlung, vermindert den Ultraviolettanteil der Sonnenstrahlung und prägt die Temperatur durch die Gegenstrahlung im langwelligen Bereich des Spektrums.

Die Bewölkungsmenge wird im österreichischen Wetterbeobachtungsdienst von einem/einer geschulten BeobachterIn geschätzt, daher ergeben sich in den Zeitreihen größere Unsicherheiten als in jenen der Elemente mit einer präzisen Messung. Die Bewölkungstrends verliefen im Flachland verglichen mit denen der hochalpinen Region unterschiedlich. Ein markanter Anstieg der Bewölkungsmenge am Berg, der vor allem im Winter sichtbar wird, steht einem eher gleichbleibenden bis leicht fallenden Bewölkungstrend im östlichen Flachland gegenüber. Abgesehen von unterschiedlichen Trends Flachland/Berg lässt die Abbildung 3.11 die typische Bewölkungscharakteristik des Alpenraumes erkennen. Wintermonate sind häufig durch austauscharme Wetterlagen mit eher tiefliegender stratiformer Bewölkung gekennzeichnet, Nebel oder Hochnebel im Tal, Schönwetter in den Bergen. Im Winter kehrt sich die Situation um. Häufig konvektive Bewölkungsformen hüllen die Berggipfel ein, im Flachland ist der Himmel leicht bis mäßig bedeckt.

Luftfeuchtigkeit

Die gemessene relative Luftfeuchte ist ein Maß für den Wasserdampfgehalt der Luft, der sich formelmäßig unter zusätzlicher Verwendung der Lufttemperatur berechnen läßt. Wasserdampf ist ein natürliches Treibhausgas, seine Änderung daher von großem Interesse. Zum langfristigen Luftfeuchtigkeitsmonitoring kann Österreich 15 Langzeitreihen in monatlicher Auflösung bereitstellen. Die ersten brauchbaren Messungen stammen aus der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts; die Digitalisierung und Homogenisierung erfolgte im Projekt ALOCLIM (Auer et al., 2001b). Die jährlichen Zeitreihen der Stationen in den Niederungen sind von einer auffälligen Abnahme im 20. Jahrhundert gekennzeichnet, welche im Winter und nach 1970 besonders ausgeprägt ist. Regionale Analysen zeigten, dass die stärkste Abnahme im Norden und

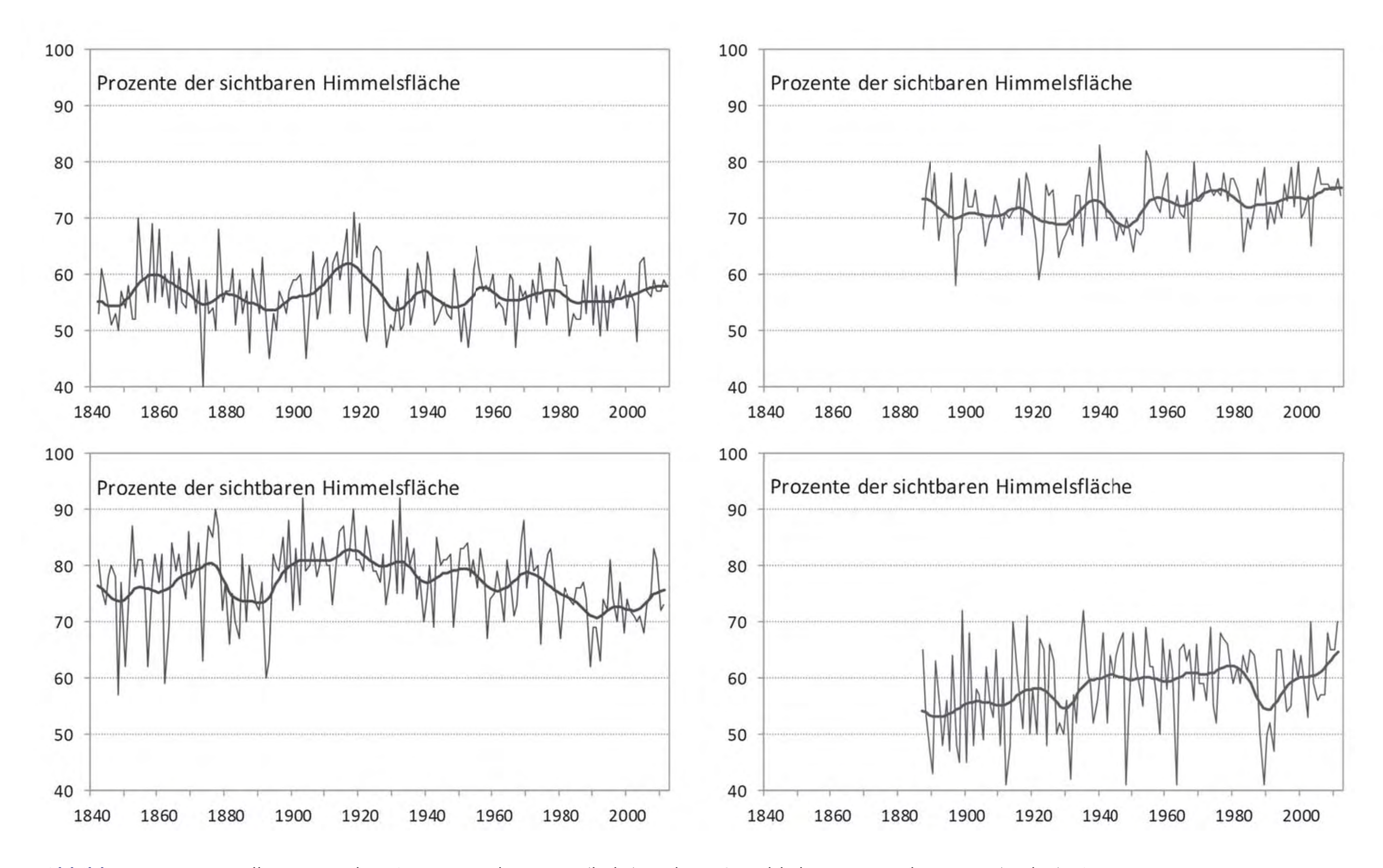
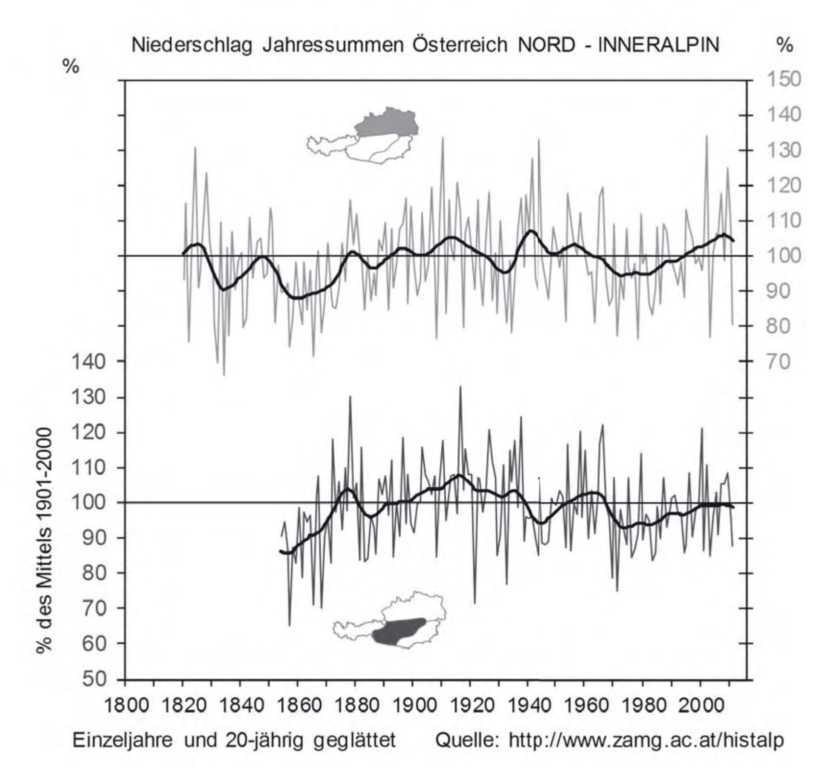


Abbildung 3.11 Bewölkungsmittel in Wien 1842 bis 2012 (links) und am Sonnblick von 1887 bis 2012 (rechts). Wien repräsentiert eine Flachlandstation im Osten von Österreich, der Sonnblick die hochalpine Region. Eine Gegenüberstellung der Grafiken läßt die Charakteristika der Bewölkungsverteilung gut erkennen. Gezeigt werden die Bewölkungsmittel vom Sommer (Juni bis August) und Winter (Dezember bis Februar). Einzelwerte dünn, 20 jährig geglättet dicke Kurven. Datenquelle: ZAMG, Daten homogenisiert

Figure 3.11 Mean cloudiness in Vienna 1842–2012 (left) and at Sonnblick 1887–2012 (right side). Vienna represents a lowland station in the East of Austria, Sonnblick a high alpine station. A comparison of the graphs shows the typical cloudiness features. Shown is the mean cloudiness in summer (June to August) and winter (December to February). Single values (thin) and 20 yrs smoothed curves (bold). Data source ZAMG, homogenized data

Osten beobachtet wurden. Ein komplett anderes Bild zeigte sich an den wenigen Bergstationen, die zur Verfügung standen. Eine langfristige Änderung der relativen Feuchte ist nicht zu erkennen, die Werte schwanken nur wenig (±2 %) um das langjährige Mittel der Jahre 1961 bis 1990. Der aus relativer Feuchte und Lufttemperatur berechnete Dampfdruck repräsentiert den absoluten Feuchtigkeitsgehalt der Luft. Langfristig zeigt er einen Anstieg, besonders stark erkennbar im Sommer mit einzelnen Maxima um 1890, um 1950 und weiter ansteigend nach 1980. Die Jahreskurven spiegeln größtenteils den Verlauf des Sommers wider, im Winter bewegen sich die niedrigen Werte nur wenig um das Mittel. Im Gegensatz zur relativen Feuchte laufen die Kurven für das Tiefland und die Bergstationen gleichförmig. Auer et al. (2001b) haben auch eine Korrelationsanalyse zwischen Dampfdruck und anderen Klimaelementen durchgeführt. Demnach zeigen die Dampfdruckreihen eine hohe signifikante Korrelation von nahezu 0,8 zum Lufttemperaturmittel, sowohl in der Niederung als auch in der alpinen Region, was mit dem starken Anstieg von Lufttemperatur und Dampfdruck konform geht.

Eine höhere zeitliche Auflösung aufweisend, jedoch in seiner Gesamtlänge kürzer, ist der Startclim-Datensatz zum Dampfdruck, der eine tägliche Auflösung anbietet (Auer et al., 2005). Die Homogenisierung dieser Daten wird derzeit im ACRP Projekt CC-IMPATY vorgenommen (ACRP Projektnummer KR12AC5K01255), sodass mit Ende 2014 ein homogenisierter Tagesdatensatz von relativer Feuchte bzw. Dampfdruck für die Klimafolgenforschung zur weiteren Analyse der Luftfeuchtigkeit in Zusammenhang mit beispielsweise Schwüle, Schimmelpilzbildung, Sporenverbreitung, u. a. bereit stehen wird.



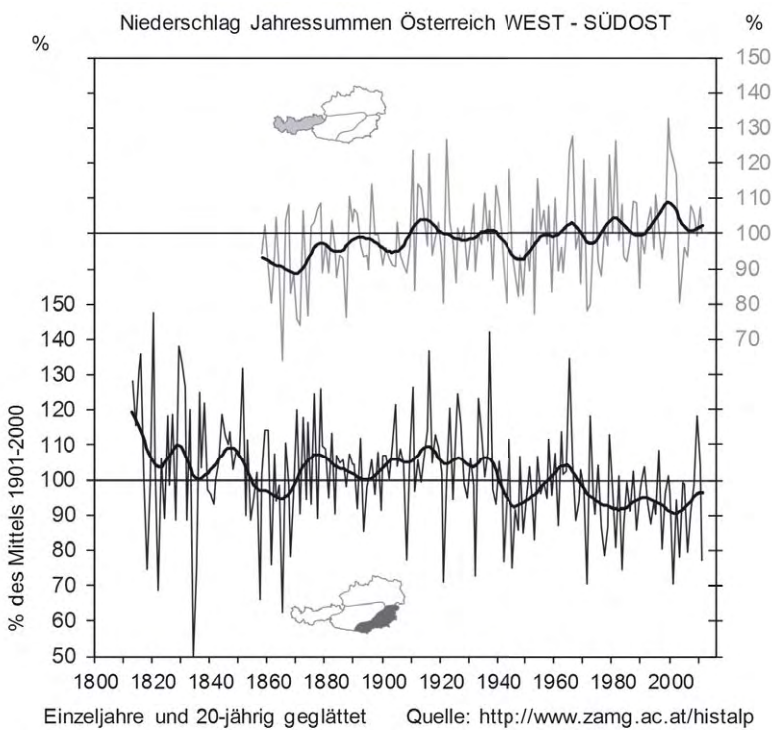


Abbildung 3.12 Anomalien der Jahressummen des Niederschlages zum Mittel des 20. Jahrhunderts für vier Subregionen Österreichs. Einzeljahre und 20-jährig geglättet (Gauß'scher Tiefpass), Zeitreihen alle aktualisiert bis 2011. Die Ausdehnung der Subregionen ist aus den kleinen Kärtchen in den Diagrammen ersichtlich, Beginn unterschiedlich bis zurück zum Jahr 1813, Grafik: Böhm (2012), erstellt aus HISTALP-Daten (http://www.zamg.ac.at/histalp)

Figure 3.12 Anomalies of the annual precipitation totals relative to mean of the 20th century for four Austrian sub-regions. Single values and 20 yrs. smoothed values (Gaussian low pass filter). The position of the sub-region is illustrated in the small maps inside the diagrams. Time series date back until 1813 but with differing starting time and last until 2011. Copyright by R. Böhm, 2012, source HISTALP (http://www.zamg.ac.at/histalp)

Niederschlag

Für den Niederschlag ist wegen seiner starken räumlichen Variabilität die Berechnung von Gebietsmitteln für Teilregionen sinnvoller als über den gesamten Großraum Alpen bzw. über ganz Österreich. Die Niederschlagstrends und die kurzfristigere Variabilität für den Großraum Alpen wurde für die Zeit zurück bis 1800 in Auer et al. (2005, 2007), Efthymiadis et al. (2006, 2007), und Brunetti et al. (2006, 2009) beschrieben. Als hervorstechendes Merkmal kann der „Alpine Niederschlagsdipol" bezeichnet werden (Böhm, 2006). Darunter ist eine langfristige Gegenläufigkeit der Niederschlagstrends im Nordwes-

ten gegenüber dem Südosten des Alpenbogens zu verstehen, die seit Mitte des 19. Jahrhunderts beobachtbar ist. Um etwa 10–15 % haben die Niederschläge im Nordwesten (Ostfrankreich, Schweiz, Süddeutschland, Westösterreich) zugenommen, im Südosten (Adriaraum, Südostösterreich, Südungarn, Slowenien, Kroatien, Bosnien-Herzegowina) um etwa denselben Betrag abgenommen. Der fallende Niederschlagstrend im Südosten findet bereits seit Beginn der instrumentellen Periode statt, während im Nordwesten bis zu den sehr trockenen 1860ern zunächst fallende Niederschlagstrends vorlagen.

Auch im kleineren Österreich gibt es keine einheitlichen Niederschlagstrends. Räumliche Repräsentanz kann nur erreicht werden, wenn eine Unterteilung in vier Subregionen vorgenommen wird: Westösterreich, inneralpine Gebiete, den außeralpinen Norden und den Südosten (Abbildung 3.12).

Die für den Großraum Alpen beschriebenen gegenläufigen Langfristtrends sind auch in Österreich gegeben. In Tirol und Vorarlberg hat der Niederschlag in den vergangenen 150 Jahren zugenommen, im Südosten jedoch hat er seit dem dortigen Reihenbeginn (1813) abgenommen. Für das Inneralpinum und den Norden liegt kein Langfristtrend vor, hier dominieren die dekadischen Variationen. Diese besitzen in allen Teilen Österreichs ein dominantes Minimum in den trockenen 1860er Jahren, das nur im Südosten seither wieder erreicht bzw. unterboten wurde und zwar in den trockenen 1940ern und in den anhaltend trockenen Jahrzehnten nach 1970.

Sehr feuchte Jahrzehnte gab es in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts, was jedoch für Österreich infolge des hier teilweise späteren Beginns der Zeitreihen nur für den Südosten und mit Einschränkungen für den Norden aus Zeitreihen belegbar ist. Diese hohen Niederschläge spielten jedoch eine bedeutende Rolle bei den starken Gletschervorstößen in dieser Zeit, die in den beiden Maximalständen der Gletscher in den 1810er Jahren und um 1850 führten. Der Temperaturverlauf allein reicht zum Verständnis dieser Gletscherhöchststände nicht aus (Schöner und Böhm, 2007; Böhm et al., 2007, siehe auch Band 2.

In den Jahrzehnten zwischen 1900 und 1940 ist eine langanhaltende feuchte Periode in Österreich gut belegt, diese war im Inneralpinum und im Südosten beinahe durchgehend festzustellen, im Westen war sie gedämpft und im Norden gab es eine Unterbrechung durch eine trockene Phase um 1930. Nach den im Norden und im Alpeninneren darauffolgenden Negativtrends gab es hier in den 1970er Jahren eine markante Trendwende, die vor allem im Norden und Nordosten Österreichs im ersten Jahrzehnt des 21. Jahrhunderts ein neues Hauptmaximum des Niederschlages erreichen ließ. In der inneralpinen Region ist das aktuelle Niederschlagsniveau ebenfalls das höchste seit Beginn der Messreihe (1858). Im Alpeninneren liegt das aktuelle Niederschlagsniveau im langjährigen Durchschnitt des 20. Jahrhunderts, im Südosten – im Zug des fallenden Jahrhunderttrends – rund 10 % unter diesem. Die hier um das Jahr 2000 eingetretene Andeutung einer Trendumkehr mag mit derjenigen des Luftdrucks (vgl. Abbildung 3.7) zusammenhängen, dauert jedoch noch zu kurz, um statistisch signifikant zu sein.

Im Gegensatz zu der österreichweiten gleichförmigen Erwärmung ist die Niederschlagsentwicklung in Österreich und im Großraum Alpen sehr unterschiedlich ausgefallen – vor allem wenn man die saisonalen Verläufe (Beispiel für die Region Südost in Abbildung 3.13) in Rechnung stellt. Generell sollte nicht aus Einzelbefunden verallgemeinert werden – weder von Sommer-Niederschlagskurven auf solche des Winters oder der Jahressummen, noch von einer Region auf die andere.

Das im globalen Maßstab winzige Österreich (0,1 Promille der Erdoberfläche) aber auch der Großraum Alpen mit 0,1 % der Erdoberfläche zeigen beide sehr unterschiedliche dekadische Klimaanomalien bis hin zu den oben besprochenen über mehr als ein Jahrhundert hindurch sogar gegenläufigen Langfristtrends. Alles, was an Klimaentwicklungen im „globalen Mittel“ stattfindet, zeigt regional oft ganz andere Trends und Variationen. Bei der Temperatur war im Großraum Alpen die Erwärmung der aktuellen Jahrzehnte viel stärker war als im globalen Durchschnitt, bei der Sonnenscheindauer zeigte sich eine massive aber zweifellos regional begrenzte Zunahme des „Schönwetters“ und beim Niederschlag sogar gegenläufige Langfristtrends innerhalb Österreichs.

Diese Tatsache stellt eine große Herausforderung an die Klimamodellierung (vgl. Band 1, Kapitel 4 – regionale Klimamodellierung, Band 2 – Impaktmodellierung und Band 3 – Adaptation) dar, die für die Zukunftsaussichten die einzige Informationsquelle darstellt. Da Anpassungsstrategien immer nur mit den regionalen bis lokalen Auswirkungen des Klimawandels zu tun haben, sind hier weniger die großräumigen bis globalen Effekte von Interesse, welche die physikalisch-mathematischen Klimasimulationen bereits ganz gut im Griff haben. Was für Planungszwecke, für wirtschaftliche Abschätzungen gebraucht wird, ist eine Simulation der regionalen (z. B. große Flusshochwässer, Dürrezonen in Landwirtschaftsgebieten, forstliche Herausforderungen) bis lokale Veränderungen (z. B. Schigebiete, Stadtgebiete) – also Klimasimulationen in hoher bis höchster räumlicher Auflösung.

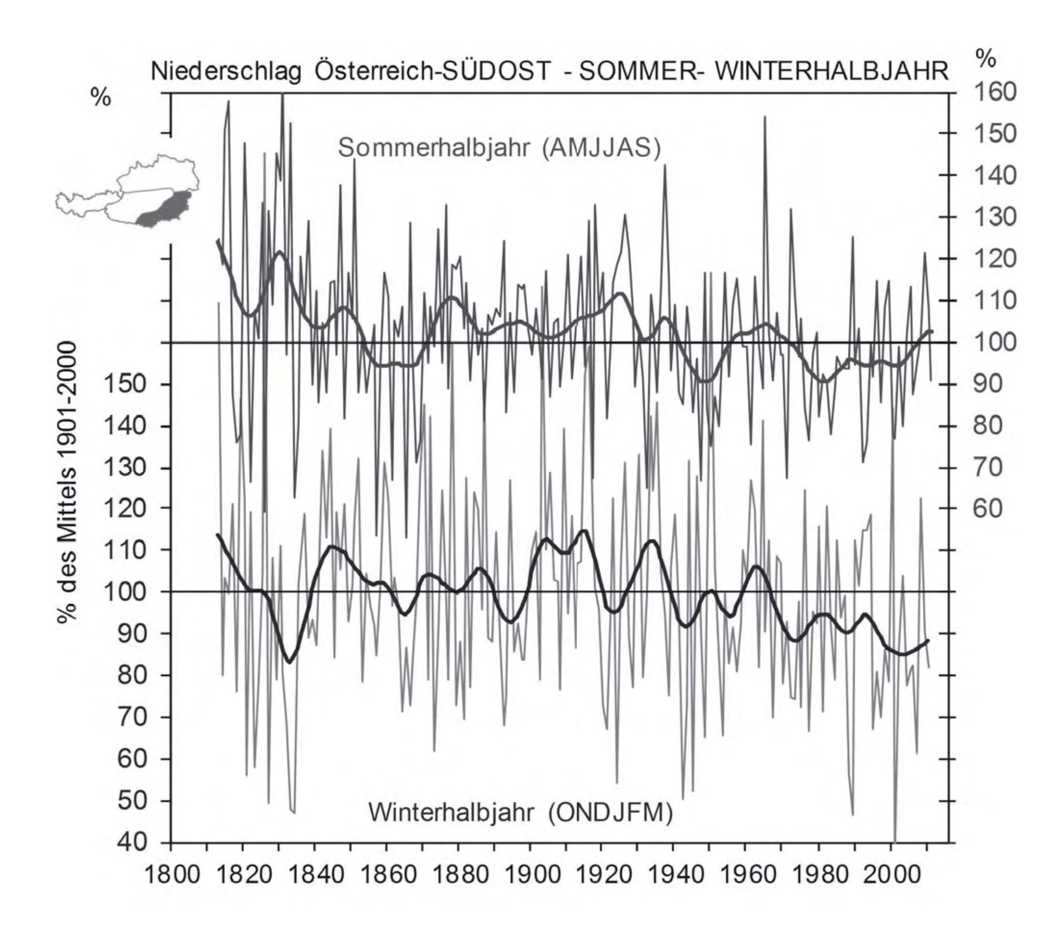


Abbildung 3.13 Anomalien der Halbjahressummen des Niederschlages zum Mittel des 20. Jahrhunderts für die Österreich-Subregion SÜDOST. Einzeljahre und 20-jährig geglättet (Gauß'scher Tiefpass) 1813 bis 2011, Grafik: Böhm (2012), erstellt aus HISTALP-Daten

Figure 3.13 Anomalies of half year precipitation totals 1813–2011 relative to the 20th century mean for the Austrian sub-region southeast. Single values and 20 yrs. smoothed (Gaussian filtering), source Böhm 2012, data source HISTALP

3.2.6 Instrumentelle Periode – Extremereignisse

Klimawandel und Extremwerte

Ein Thema steht in der öffentlichen Debatte über den Klimawandel im Zentrum des Interesses, der Zusammenhang zwischen „dem Klimawandel" und einer Zunahme extremer Wetter- und Klimaereignisse. Wissenschaftlich sauber lässt sich dieser Zusammenhang allerdings weit weniger einfach beschreiben, dokumentieren, analysieren, modellieren sowie schlussendlich eindeutig und rational beantworten. Generell ist es bei der Analyse der Klimavariabilität einfacher langfristige und großräumige Entwicklungen (Trends, dekadische Anomalien) zu untersuchen und eindeutig zu belegen, als „Ausreißer", die meist kleinräumig im Verhältnis zur gegebenen Messnetzdichte bzw. zur räumlichen Auflösung der Klimamodelle sind. Als weitere Schwierigkeit kommt hinzu, dass Extremwerte per Definition natürlich selten auftreten, was ein zusätzliches Problem der notwendigen Stichprobenlänge bzw. der Länge des Modelllaufs aufwirft. Der Themenkreis Extremwerte im Klimawandel ist daher mit großen Unsicherheiten behaftet.

Die Festlegung welches Ereignis bzw. welcher Wert einer Klimavariablen nun als extrem eingestuft wird, kann auf drei verschiedene Arten erfolgen (z. B. Stephenson, 2009): erstens nach der Magnitude, zweitens der Wiederkehrwahrscheinlichkeit oder drittens deren Auswirkung. Bei der Definition der Wirkung ist die Verletzbarkeit eines Systems entscheidend.

Die Ableitung von Aussagen über die Veränderung von Extremereignissen in der Klimazukunft ist aus den zu Beginn genannten Gründen als höchst herausfordernd zu bezeichnen. Die Unsicherheit in den Klimaprojektionen (vgl. Band 1, Kapitel 4) hängt dabei ganz wesentlich von der Qualität, Quantität und vor allem bei Extremereignissen von der Aufzeichnungslänge der Datengrundlage der Vergangenheit ab (z. B. IPCC, 2012). So zeigt sich in aktuellen Studien immer wieder, dass Trends der letzten Jahrzehnte bei Verwendung von 100-jährigen oder noch längeren Datenreihen oft völlig neu zu bewerten sind. (z. B. Hiebl und Hofstätter, 2012; KLIWA Arbeitsgruppe[17], Frei und Schär, 2001). Des Weiteren sind die Unsicherheiten von der Art des Extremereignisses abhängig und unterscheiden sich meist auch in Abhängigkeit vom Untersuchungsgebiet (z. B. Christensen et al., 2007).

Der kürzlich erschienene IPCC-Report „Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change ad-

[17] http://www.kliwa.de/index.php?pos=ergebnisse/projerg/starkniederschlag/

aptation“ (IPCC, 2012) untersucht u. a. die aktuellen Trends verschiedener Extremwertindizes im Zusammenhang mit den durch sie verursachten Schäden und den daraus folgenden vorgeschlagenen Anpassungsmaßnahmen. Nach IPCC-SREX ist „ein extremes Wetter- oder Klimaereignis über oder unter einer Schranke, die nahe den äußeren Enden der beobachteten (observed) Werte einer Klimavariablen liegt. SREX bezeichnet sowohl extreme Wetter- als auch Klimaereignisse als „climate extremes“. Tägliche Klimareihen haben oft Probleme durch meist eher kurze Zeitreihen, die nicht weit genug in die vor-anthropogene Zeit reichen und durch die oft ungenügende Messnetzdichte (Abschnitt 3.1.2). Dies hat negative Auswirkungen auf die statistische Signifikanz und bereitet Probleme bei der Homogenisierung (vgl. Abschnitt 3.1.3). Ein Umstand welcher etwa bei Moberg et al. (2006) für die Datenlage Europas sehr gut beschrieben wird. Längere Zeitreihen mit einer günstigeren Relation Messnetzdichte vs. räumliche Dekorrelation (vgl. Scheifinger et al., 2003; Aguilar et al., 2003; Mestre et al., 2011) existieren im Großraum Alpen mit monatlicher Auflösung. Sie sind geeignet um über „Klimaextreme“ Aussagen zu machen, während „Wetterextreme“ eher den Zeitreihen mit täglicher oder noch kürzerer Auflösung zuzuordnen sind. Aus dem Klimawandel selbst ergeben sich Klimafolgen („climate impacts“), die in aller Ausführlichkeit in Band 2 behandelt werden.

Bei den Extremwerten im Klimawandel kommt es zu einer Vermengung zweier Skalen – der langfristig vor sich gehende „globale Klimawandel“ mit den sehr kurzfristigen, räumlich hoch differenzierten und seltenen Klimaextremen, die hauptsächlich auf lokaler, sehr selten regionaler Basis ablaufen.

Regionale Klimaextremereignisse auf der Basis von HISTALP-Monatszeitreihen

Noch heute führt in der Extremwertdebatte im Zusammenhang mit dem Klimawandel der Sommer 2003 die Hitliste an (z. B. Schär et al., 2004; Schär und Jendritzy, 2004), in Österreich in ähnlich starker Präsenz das Hochwasserereignis vom August 2002 (z. B. Habersack und Moser, 2003; Sattler et al., 2003). Ersteres ist per se ein saisonales Ereignis und damit in den HISTALP-Zeitreihen vorhanden. Aber auch das beispielhaft in Abbildung 3.14 gezeigte nur einige Tage andauernde Niederschlagsereignis, das zum Hochwasser im August 2002 geführt hat, ist in den entsprechenden monatlichen Zeitreihen gut zu erkennen, was nicht von vornherein zu erwarten war.

Neben dem oben Gesagten verdeutlichen die gezeigten Niederschlagszeitreihen auch, wie räumlich begrenzt selbst ein Großereignis wie jenes vom August 2002 ist. Die im Kerngebiet des Hochwassers aufgetretenen Monatssummen, die etwa in Freistadt mehr als doppelt so hoch waren, wie der zweithöchste je gemessene Wert, in einigen anderen Zeitreihen noch den absolut höchsten Wert auch sehr langer Zeitreihen darstellt, ist das im nicht sehr weit entfernten Wien nicht mehr der Fall und in Regensburg war der August 2002 im langjährigen Vergleich nicht mehr auffällig.

Veränderung des Schwankungsbereichs

Eine Analyse zeitlich aggregierter saisonaler und jährlicher Zeitreihen von Luftdruck, Lufttemperatur und Niederschlag (Böhm, 2012) zeigte keine ansteigende Variabilität des Klimas. Bei der Temperatur war sogar eine signifikante Abnahme der Variabilität vom 19. zum 20. Jahrhundert zu beobachten (Abbildung 3.15).

Dies gilt auch für die aktuelle „anthropogene“ aktuelle Klimanormalperiode 1981 bis 2010 (die beiden Säulen ganz rechts in der Abbildung). Bei allen drei Klimaelementen liegen sie innerhalb des gesamten Streubereichs, bei der Temperatur an dessen unterem Rand.

Dieses Ergebnis ist für alle GAR-Subregionen stabil, sowohl für Jahreswerte als auch für die saisonalen Entwicklungen. Die extremen Außenbereiche der Häufigkeitsverteilungen ändern sich parallel zu den Trends der Mittelwerte (Böhm, 2012). Für abgeleitete Größen, die auf Schwellwertüber- oder Unterschreitungen beruhen, wie etwa Frosttage, Sommertage etc. kann eine leichte Verschiebung des Mittelwertes allerdings zu einem überproportionalen Anwachsen führen.

Exzessive Monatsniederschläge in alpinen Flusseinzugsgebieten

Haslinger et al. (2011) haben die Zu- bzw. Abnahme von exzessiv nassen Monaten und exzessiv trockenen Monaten für verschiedene Flussgebiete in der GAR über einen Perzentilansatz untersucht und als „dekadische Anomalien“ von der jeweiligen 200-jährigen Statistik ausgewiesen. Sie fanden in den vergangenen beiden Jahrhunderten keine generelle Zunahme der exzessiven Monatsniederschläge in den großen alpinen Einzugsgebieten. Es überwogen die dekadischen Anomalien, deren Großereignis der beiden vergangenen Jahrhunderte die trockenen 1860er Jahre waren, mit beinahe dreifach erhöhter Häufigkeit von Trockenereignissen. Die exzessiv nassen Ereignisse zeigen einen schwachen (nicht signifikanten) langfristigen Rückgang, die exzessiv trockenen einen markanten Anstieg in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts, in den eineinhalb Jahrhunderten seither jedoch keinen Trend. Die bisher

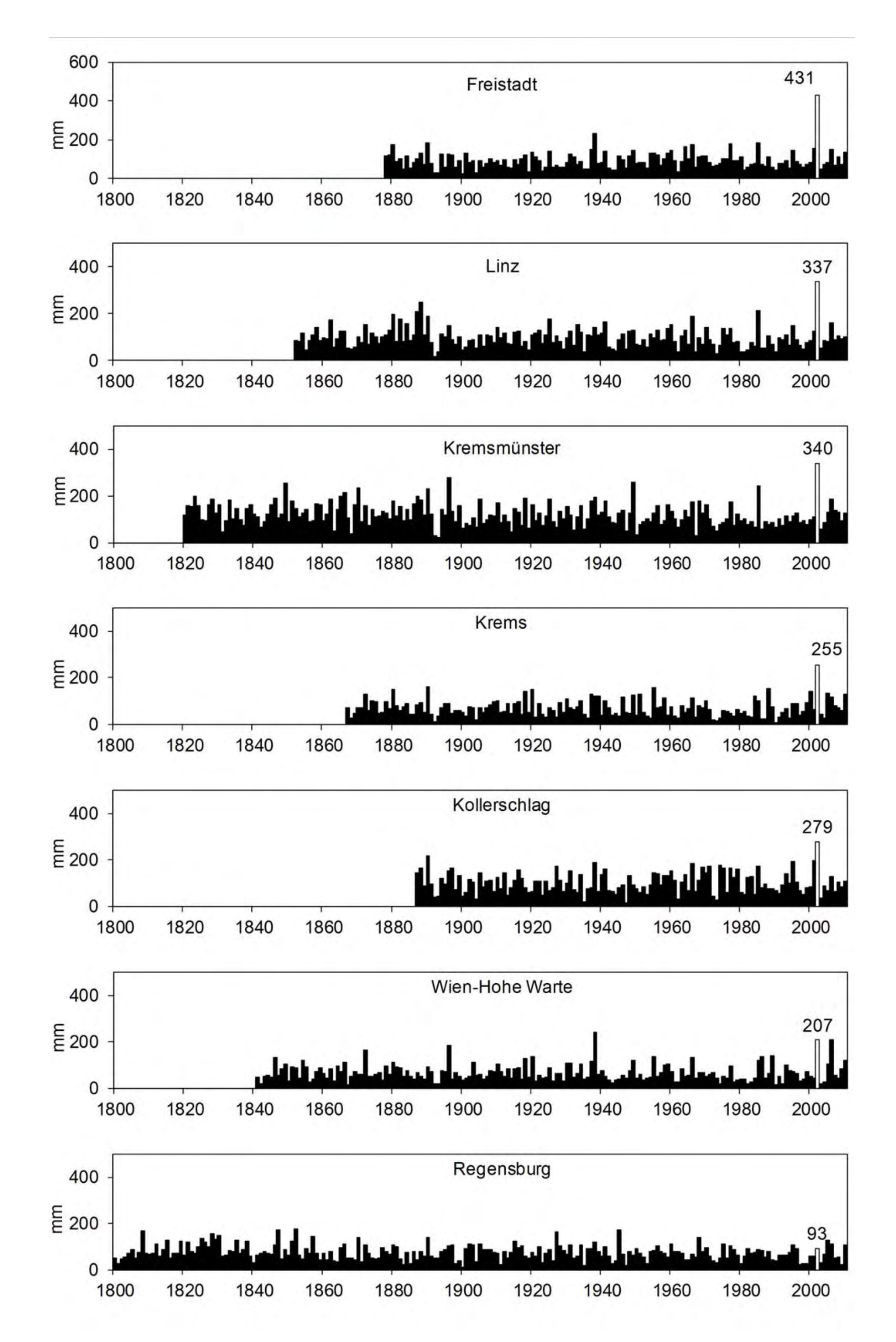
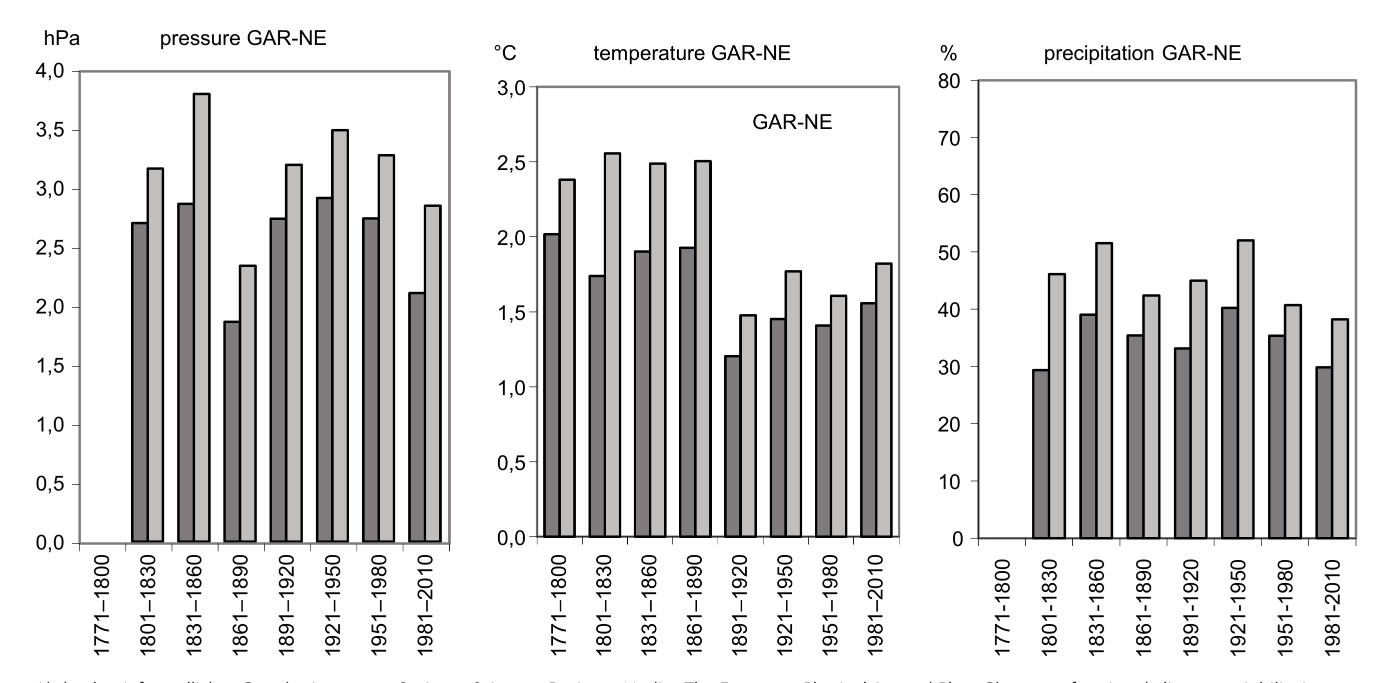


Abbildung 3.14 Niederschlagszeitreihen für den Monat August im Gebiet des extremen Hochwasserereignisses im August 2002. Der August 2002 ist hervorgehoben und mit dem Zahlenwert der damaligen Monatssumme beschriftet. Grafik: Böhm (2009), erstellt aus HISTALP-Daten, aktualisiert und erweitert

Figure 3.14 Time series of August precipitation totals. Displayed are stations situated in the area of the extreme flooding event in August 2002. The precipitation sums of August 2002 are highlighted and labeled with their absolute monthly sum (after Böhm 2009, updated and extended. Data source: http://www.zamg.ac.at/histalp



Abdruck mit freundlicher Genehmigung von Springer Science+Business Media: The European Physical Journal Plus; Changes of regional climate variability in central Europe during the past 250 years; 127:54; 2012; S. 21; Böhm, R.; Abb.6

Abbildung 3.15 Perzentilbereiche 80 % (dunkelgrau) und 90 % (hellgrau) der jährlichen enttrendeten Klimazeitreihen der GAR-Subregion Nordost in 30-jährigen diskreten Subintervallen von 1771–1800 bis 1981–2010. Grafik: Böhm (2012), erstellt aus HISTALP-Daten

Figure 3.15 80 % (dark grey) and 90 % (light grey) percentile range of annual detrended time series of air pressure, air temperature and precipitation of the GAR sub-region northeast in 30 yrs. subintervals from 1771–1800 to 1981–2010. Böhm, 2012, data source HISTALP

analysierten „anthropogenen Jahrzehnte" seit 1981 verhalten sich bezüglich exzessiv nasser und exzessiv trockener Jahreszeiten und Jahren unauffällig.

Regionale Klimaextremereignisse auf der Basis von Tageswerten

Temperatur

Täglich aufgelöste Temperaturdaten haben gegenüber Monatswerten den Vorteil, Schwankungen in der synoptischen Zeitskala zu erfassen und damit näher am erlebbaren Witterungsgeschehen zu sein. So konnten Hiebl und Hofstätter (2012) mögliche Änderungen in der Sprunghaftigkeit und Ausgeprägtheit von Tag-zu-Tag-Temperaturschwankungen analysieren in Hinblick darauf, ob ein immer abrupterer Wechsel zwischen kalten und warmen Episoden tatsächlich existiert oder ob im Gegensatz dazu Temperaturepisoden zunehmend persistenter werden. Standardisierte und trendbereinigte tägliche Temperaturanomalien bildeten die Grundlage für die Anwendung von drei eigens definierten Variabilitätsindizes. Der erste, die Volatilität (Sprunghaftigkeit) des Temperaturklimas, gibt an, wie häufig und heftig die Temperatur um den Normalwert pendelt; er definiert sich mathematisch als die Länge der Anomalielinie innerhalb eines Zeitraumes, konkret des Kalenderjahres. Der zweite, die Devianz (Abweichung), zeigt an, wie weit kalte und warme Episoden vom Klimamittel entfernt sind; er entspricht der Summe der Flächen zwischen jährlicher Anomalie- und langjähriger Mittellinie innerhalb des Kalenderjahres. Der dritte Variabilitätsindex ist die Kombination aus den beiden vorherigen und gibt an, wie extrem Temperaturschwankungen insgesamt ausfallen. Das Ergebnis lässt sich in drei Punkten zusammenfassen:

- Im Gegensatz zur Temperatur selbst zeigen die drei Variabilitätsindizes während den letzten 140 Jahren keine klare Richtung (Abbildung 3.16). Bis 1915 schwächten sie sich bei hoher zwischenjährlicher Variabilität leicht ab, seither nahmen sie leicht, bis auf das Niveau des späten 19. Jahrhunderts, zu.
- Der schwache Anstieg nach 1915 ist vor allem auf das Sommerhalbjahr zurückzuführen.
- Daraus folgend gibt es in Österreich im Untersuchungszeitraum keinen Zusammenhang zwischen der allgemeinen Erwärmung und Änderungen in der mehr-

tägigen Temperaturvariabilität. Die Frage nach zunehmend intensiven Temperaturkapriolen muss verneint werden.

Extremwertindizes

In der relativ kurzen Periode 1961 bis 2000, für die mehr als 50 homogenisierte Tageszeitreihen vorliegen, konnten bei der Temperatur überraschend viele signifikante Trends für die meisten der zahlreichen Extremwertindizes gefunden werden, die sowohl am unteren (kalten) Ende der Häufigkeitsverteilungen als auch am oberen (warmen) Ende ähnlich sind. Alle Trends verlaufen analog zur beobachteten generellen Erwärmung in diesem Zeitraum. Als Beispiel sind in Abbildung 3.17 die Zunahme der „warmen Nächte" (TN90P) der Abnahme der „kalten Nächte (TN10P) gegenübergestellt. Erstere geht auf die Überschreitung des 90 %-Perzentils der Tagesminima zurück, letztere auf die Unterschreitung des 10 %-Perzentils der Tagesminima. Beide zeigen für die homogenisierten Datensätze (links oben) für etwa die Hälfte aller Standorte signifikante dekadische Trends mit Änderungsraten (lineare Regression, Tage pro 10 Jahre) von einigen Tagen pro Dekade. Größere systematische räumliche Unterschiede sind nicht zu erkennen, weder bei den gezeigten beiden Beispielen, noch bei den anderen (hier nicht gezeigten) Extremwertindizes. Deutlich zu sehen ist im Vergleich zu den beiden unteren Karten die Verbesserung der Qualität durch die Homogenisierung. Die nicht homogenisierten Datensätze liefern infolge des nicht beseitigten nichtklimatologischen „Lärms" so gut wie keine signifikanten Aussagen. Es ist somit, wenn der arbeitsintensive Aufwand der Homogenisierung nicht gescheut wird, durchaus möglich, aus der „low confidenz Falle" zu entkommen, die im IPCC-SREX Report beklagt wird.

Eine weitere Analyse zur nächtlichen Abkühlung stammt von Gerersdorfer et al. (2006). Sie beruht auf Auswertungen der Minimumtemperatur, die normalerweise in der Nacht erreicht wird. Ein Vergleich der Perioden 1961 bis 1990 und 1985 bis 2005 ergab an allen untersuchten Stationen eine deutliche Verschiebung der Häufigkeitsverteilung einiger ausgewählter Schwellwerte zu höheren Temperaturen.

Niederschlag

Beim Niederschlag sind während der anthropogenen Erwärmungsphase deutlich weniger signifikante Trends als bei der Temperatur gefunden worden (Nemec et al., 2011; Projekt

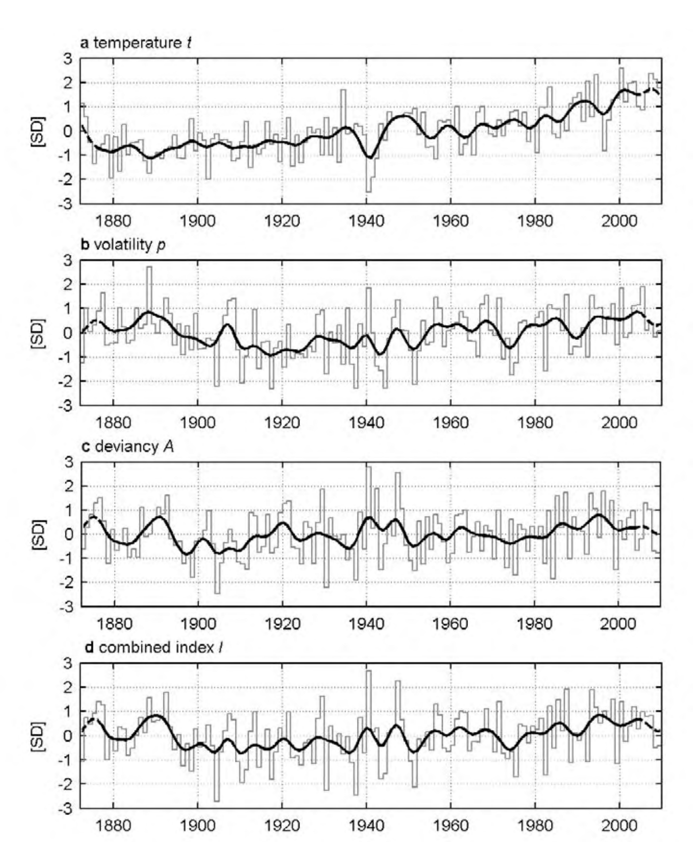


Abbildung 3.16 Während es auf der Hohen Warte (Wien) im Zeitraum 1872 bis 2010 zu einem markanten Temperaturanstieg kam (a), enthüllen drei Indizes der mehrtägigen Temperaturvariabilität (b–d, siehe Text) keine eindeutigen Trends. Zur besseren Vergleichbarkeit sind alle Größen als standardisierte Abweichungen vom Mittelwert der gesamten Zeitreihe dargestellt (Stufen – jährliche Werte, Linie – 11-jährlicher Gauß-Tiefpassfilter). Nach: Hiebl und Hofstätter (2012)

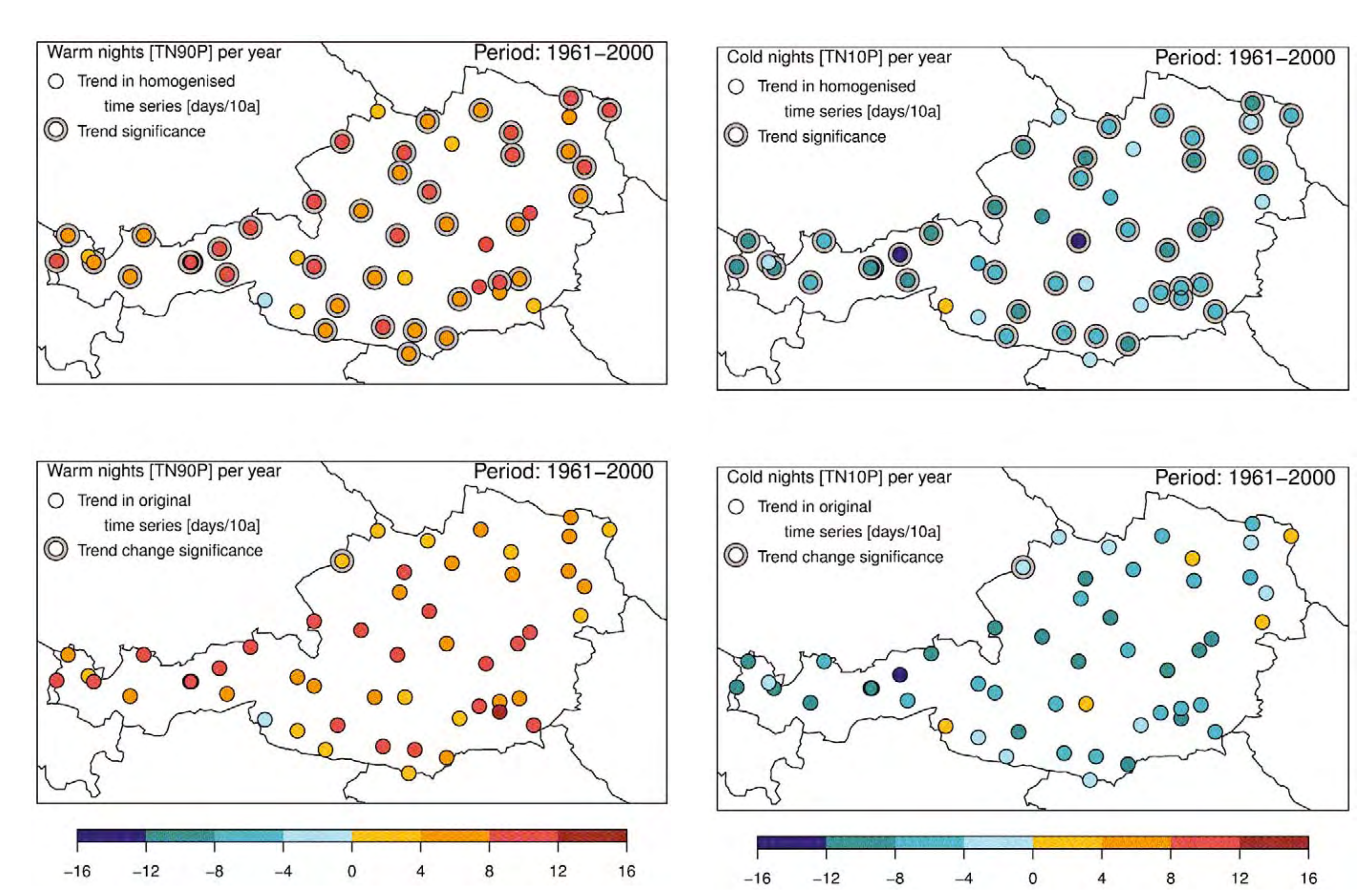
Figure 3.16 Time series of air temperature (a) and indices of multi-day temperature variability (b, c, d) of Wien-Hohe Warte 1872–2010. For better comparison all variables are expressed as standardized deviations of the long-term mean 1872–2010 (columns: annual values, line graphs: 11 yrs. smoothed Gaussian low pass filter). Source: Hiebl and Hofstätter (2012)

HOM-START[18]) und es gibt auch nicht die bei der Temperatur zu beobachtende Ähnlichkeit für ganz Österreich.

Abbildung 3.18 bringt sechs Beispiele von linearen Trends 1971 bis 2000 für verschiedene niederschlagsbezogene Extremwertparameter auf der Basis von Tageszeitreihen.

Die räumlichen Trendunterschiede der Gesamtsummen sieht man leicht modifiziert auch in der Indexkarte der Nie-

[18] http://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klimaforschung/datensaetze/hom-start



Trends in extreme temperature indices in Austria based on a new homogenised dataset/Nemec, J. et al./International Journal of Climatology and Volume 33/Issue 6.

Abbildung 3.17 Lineare Trends der Extremwertindizes TN90P (warme Nächte, links) und TN10P (kalte Nächte, rechts) für die homogenisierten Datensätze (oben) und für die nicht homogenisierten Datensätze (unten) im Zeitraum 1960 bis 2000 in täglicher Auflösung (Nemec et al., 2012). Eingeringelte Kreise stehen für signifikante Trends auf dem Niveau 95 %. Zur Definition der Extremwertindizes vgl. Tabelle 3.1

Figure 3.17 Comparison of linear trends of climate change detection indices TN90 (warm nights, left) and TN10 (cold nights, right) based on homogenized time series (top) and non-homogenized time series (bottom) in daily resolution for 1960–2010 (Nemec et al., 2012). Encircled circles represent significant trends on the 95 % level. For definition of climate change detection indices see Table 3.1

derschlagsummen berechnet über alle Niederschlagstage von zumindest 1 mm (Abbildung 3.18 l. o.). Signifikant ansteigende Trends finden sich nur in den drei Subregionen West, Nord und Inneralpin, im Südosten gibt es keine signifikant steigenden Indexwerte PRCPTOT, jedoch einen mit einem signifikant fallenden Trend. Ebenfalls der räumlichen Verteilung der Trends der Gesamtniederschläge folgt die Indexgröße CDD (Abbildung 3.18 r. o.). Im Südosten, der als einzige Subregion 1971 bis 2000 insgesamt zurückgehende Gesamtniederschläge zeigt, stieg auch die Häufigkeit von Trockenperioden durchwegs an, für sechs Standorte sogar signifikant.

Die in der Mitte gezeigten beiden Indexkarten repräsentieren das, was am ehesten dem entspricht, was von der Intensität des Niederschlages her als Voraussetzung für Schadensereignisse durch Hochwasser angesehen werden kann – und zwar eher für lokale und kurze intensive Ereignisse der Index RX1day (links) und für eher großräumige und bedeutendere Ereignisse der Index RX5day (rechts). Bei beiden Indexgrößen gibt es kein großräumiges Muster, sondern ein buntes „Patchwork" von steigenden und fallenden Trends, die allerdings überwiegend nicht signifikant sind. Es gab somit in dem Zeitraum überwiegend anthropogener Erwärmung in Österreich keine einheitliche und keine signifikante Reaktion bezüglich der Intensität der eintägigen und auch der fünftägigen Starkregenereignisse, die sich in diesem Datensatz widerspiegelt.

Etwas einheitlicher ist das Auftreten von extremen Tagesniederschlägen, die für den Schwellenwert 30 mm / Tag in der Karte rechts unten gezeigt sind. Es gibt zwar in Österreich sowohl fallende als auch ansteigende Trends, die jedoch meist nicht signifikant sind, insgesamt überwiegt jedoch eine steigende Häufigkeit dieser starken Tagesniederschläge. Es finden

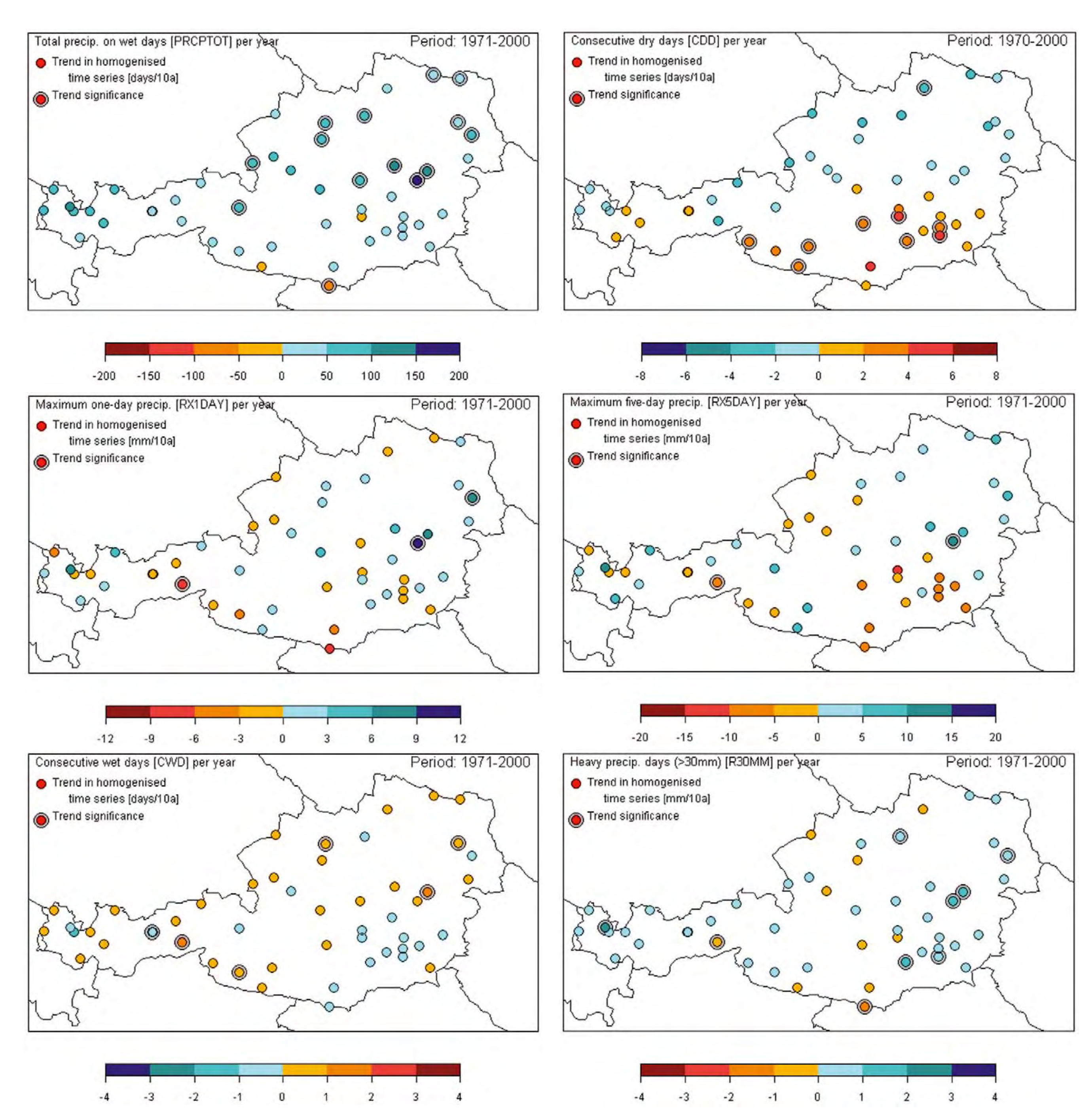


Abbildung 3.18 Lineare Trends der Extremwertindizes TN90P (warme Nächte, links) und TN10P (kalte Nächte, rechts) für die homogenisierten Datensätze (oben) und für die nicht homogenisierten Datensätze (unten) im Zeitraum 1960 bis 2000 in täglicher Auflösung (Nemec et al., 2012). Eingeringelte Kreise stehen für signifikante Trends auf dem Niveau 95 %. Zur Definition der Extremwertindizes vgl. Tabelle 3.1

Figure 3.18 Comparison of linear trends of climate change detection indices TN90 (warm nights, left) and TN10 (cold nights, right) based on homogenized time series (top) and non-homogenized time series (bottom) in daily resolution for 1960–2010 (Nemec et al., 2012). Encircled circles represent significant trends on the 95 % level. For definition of climate change detection indices see Table 3.1

sich jedoch in jeder Subregion beide Trend-Vorzeichen, sogar die signifikanten Trends sind eher zufällig verteilt.

Längere Zeitreihen mit einer Länge von 100 Jahren in homogenisierter Form wurden für Österreich nur für wenige kleine Subregionen erzeugt und analysiert, wie etwa die in der Region Hohe Tauern im Rahmen des Projekts „A Tale of two Valleys" (Auer et al., 2010). In dieser Region ist für etliche der niederschlagsbezogenen Extremwertindizes (berechnet aus homogenisierten Tagesdaten) eine deutliche Ähnlichkeit der Trends bzw. der geglätteten Verläufe (die auch die dekadischen Anomalien wiedergeben) mit denen der Jahres bzw. Jahreszeitensummen des Gesamtniederschlages gegeben. Abbildung 3.19 zeigt das exemplarisch an einem Beispiel, in Auer et al. (2010) sind weitere Beispiele gezeigt. Für die genannte Region jedenfalls lässt sich folgendes ableiten: Bei genereller Zunahme der Niederschlagssummen ist eher eine Zunahme der Extremwerte am nassen Ende der Verteilung zu erwarten, eine Abnahme der am trockenen Ende und vice versa.

Stürme

Der dritte Klimaparameter, der im Zusammenhang mit einer vermuteten Zunahme des Gefahrenpotenzials durch den Klimawandel steht, ist der Wind, bzw. dessen extreme Ausformung als Sturm. Homogenisierte Messreihen liegen bislang nicht vor, die langen Datenreihen weisen gerade beim Wind signifikante Sprungstellen auf. Drastische Beispiele dafür finden sich etwa an den Übergängen von Schätzungen (Beaufort Skala) zu echten Messdaten.

Alexandersson et al. (2000) oder etwa Bärring und von Storch (2004) haben aus dieser Situation mithilfe von Luftdruckmessungen einen Ausweg gefunden. Luftdruckmessungen an Stationen gestatten die Ableitung von Proxys für bodennahe Sturmereignisse. Der aus den Luftdruckunterschieden berechenbare „geostrophische Wind" ist ein Beispiel für solche Proxys. Da die Datenlage bei Luftdruckzeitreihen an Stationen wesentlich günstiger ist, als bei direkten Windmessreihen, kann diese abgeleitete Größe gute erste Ergebnisse für die Fragestellung der zeitlichen Veränderung der bodennahen Stürme liefern. Die Methode eignet sich besonders für die Stürme mittlerer Breiten, weniger bis gar nicht für kleinräumige Ereignisse im Bereich von Gewitterzellen, bis hin zu den tropischen Wirbelstürmen.

Für verschiedene Regionen in Europa konnten hohe Perzentile des „geostrophischen Windes" zurück bis in die 1870er Jahre abgeleitet werden (Matulla et al., 2008). Im Fall Österreichs sind die bedeutenden und flächenhaften Schadensereignisse durch das Luftdruckproxy gut abgedeckt. Hier ergibt sich aus den Luftdruckzeitreihen der Stationen Kremsmünster, Prag und Wien für hohe Perzentile (95, 99) des „geostrophischen Windes" seit dem späten 19. Jahrhundert für Stürme eine hohe kurzfristige Streuung von Jahr zu Jahr, jedoch kein signifikanter Trend. Der Übergang vom 19. in das 20. Jahrhundert ist von starker Sturmtätigkeit geprägt, gefolgt von einigen Jahrzehnten mit unterdurchschnittlichem Sturmklima, welches sich gegen Ende des 20. Jahrhunderts wieder zu mehr Sturmtätigkeit entwickelt.

Es gibt also – trotz einiger herausragender Sturmereignisse in der jungen Vergangenheit – über längere Zeit betrachtet keine Sonderstellung der aktuellen (anthropogenen) Jahrzehnte, weder in Österreich noch in anderen untersuchten Regionen Europas. Die wissenschaftliche Evaluation der Methode ist positiv verlaufen, der praktische Gegentest, zum Beispiel mit Forstschäden, steht noch aus. Hier besteht noch Forschungsbedarf, für den zurzeit die Grundlagen langer Zeitreihen von Forstschäden durch Sturm nicht vorliegen.

Schnee, Gewitter, Hagel, Tornados und andere kleinräumige Extremereignisse

Für keinen dieser potenziell schadensverursachenden Klima- und Wetterparameter können zurzeit sinnvolle Aussagen über mögliche Trends gemacht werden, die auf homogenen Zeitreihen beruhen, statistisch signifikant sind, das Kriterium einer gewissen Zeitreihenlänge erfüllen, Österreich abdecken und deren räumliche Messnetzdichte im Hinblick auf die gegebene räumliche Variabilität ausreichend ist.

Zumindest eines der angeführten Defizite, meist aber mehrere sind für diese Parameter so gravierend, dass sie sinnvolle Analysen (noch) nicht erlauben. Hoffnung für die Zukunft besteht in einigen Fällen schon, da gerade in jüngster Zeit einige (in Abschnitt 3.1.2 beschriebene) Aktivitäten gesetzt wurden, wie das steirische WegenerNet, die Aufarbeitung der täglichen Schneedaten durch den Tiroler Hydrographischen Landesdienst oder das Blitzortungsnetz ALDIS. Sie werden – wenn sie langfristig Bestand haben – wertvolle Beiträge gerade für den Fragenkomplex der Klimaextremwerte liefern. Gerade letzteres (ALDIS) ist jedoch auch ein gutes Beispiel, wie die selbstverständlich angestrebte technologische und organisatorische Weiterentwicklung eines derartigen Messnetzes letztlich zu der betrüblichen Tatsache führt, dass bei den vorliegenden (steigenden) Trends des Endresultats (Blitzhäufigkeit in Österreich in der Auflösung von 1 km) nicht zwischen den Inhomogenitäten durch die vorgenommenen Verbesserungen und evt. tatsächlich vorliegenden steigenden Trends unter-

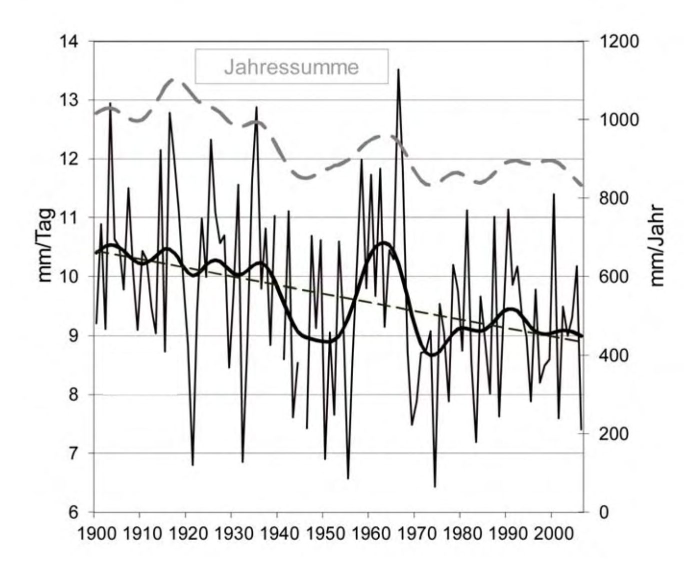


Abbildung 3.19 Zeitreihe des SDII-Index (untere Kurve: Einzeljahre, zwanzigjährig geglättet und linearer Trend in mm/Tag) und geglätteter Verlauf der Gesamtsumme des jährlichen Niederschlages (obere Kurve in mm/Jahr) 1901 bis 2008 für den Ort Flattach (Mölltal). Glättung mit Gauß'schem Tiefpassfilter, Quelle: Auer et al. (2010)

Figure 3.19 Time series of SDII index (lower graph: single years, 20 yrs. smoothed and linear trend in mm/day) and 20 yrs. smoothed annual total of precipitation (upper graph in mm/year), 1901–2008 for Flattach (Mölltal). Smoothing by Gaussian low pass filter. Source: Auer et al. (2010)

schieden werden kann. ALDIS macht auf diesen Umstand auf seiner Website auch aufmerksam. Abhilfe (Homogenisierung des Datensatzes) ist schwer bis unmöglich, da es an verwendbaren (und nicht betroffenen) Vergleichsreihen fehlt.

Klimawandel und Extremwerte – Zusammenfassung

Aus Monatsdaten konnte abgeleitet werden: Die interannuelle / intersaisonale Variabilität (die Schwankungsbreite) des Klimas hat im Großraum Alpen in den vergangenen beiden Jahrhunderten regional nicht zugenommen, beim Klimaelement Temperatur abgenommen. Die aktuelle dreißigjährige (überwiegend anthropogene) Periode von 1981 bis 2010 ist in dieser Hinsicht ebenfalls unauffällig.

- Es gibt in den vergangenen zwei Jahrhunderten (seit 1801) keine Zunahme der exzessiv nassen oder der exzessiv trockenen monatlichen Niederschläge in den großen Flusseinzugsgebieten des Großraums Alpen.
- Resultate basierend auf Auswertungen von Tagesdaten: Extremwertindizes auf der Basis von homogenisierten Zeitreihen der täglichen Maximums- und Minimumstemperaturen zeigen in der anthropogenen Periode analoge Trends zur Zunahme der Temperaturmittel, also eine Zunahme der heißen Extremwerte und eine Abnahme der kalten. Diese Trends sind österreichweit ähnlich und meist signifikant.
- Extremwertindizes auf der Basis homogenisierter Zeitreihen täglicher Niederschlagssummen sind in der anthropogenen Periode meist nicht signifikant und räumlich patchworkartig verteilt, zum Teil mit gegenläufigen Entwicklungen.
- Aus Luftdruckdaten abgeleitete Zeitreihen der Sturmtätigkeit zeigen seit den 1870er Jahren starke interannuelle Variabilität jedoch keine signifikanten Trends. Auch die aktuellen anthropogen geprägten Jahrzehnte zeigen keine erhöhte Sturmtätigkeit.

3.2.7 Variabilität und Trends in der freien Atmosphäre im Alpenraum

Seit Ende des 19. Jahrhunderts werden Klimabeobachtungen auf Bergstationen durchgeführt, seit Mitte des 20. Jahrhunderts gibt es tägliche Beobachtungen der freien Atmosphäre mit Hilfe von Radiosonden, die bis in die Stratosphäre hinaufreichen. Das Netz für solche Beobachtungen ist wesentlich gröber, mit Stationsabständen von mehreren hundert Kilometern. Die hochalpinen Beobachtungsreihen sind bereits in Abschnitt 3.2.5 abgehandelt. Hier beschränkt sich der Text auf Radiosonden und satellitengestützte Beobachtungssysteme. Lange Radiosondenzeitreihen in der Nähe des Alpenraums gibt es in Wien, Mailand, Payerne, Stuttgart und München. Sie erlauben eine dreidimensionale Betrachtung von Temperatur- und eventuell Zirkulationsänderungen über dem Alpenraum.

Der Temperaturverlauf an der Radiosonde Wien, der hier beispielhaft dargestellt ist, ist in 700 hPa dem Verlauf an hochalpinen Stationen sehr ähnlich, während in der Stratosphäre (50 hPa) eine deutliche Temperaturabnahme zu beobachten ist. Diese Temperaturabnahme ist in den Rohdaten scheinbar noch stärker, jedoch ist das durch mangelnden Schutz vor Aufheizung des Temperatursensors bedingt. Dieses Problem wurde erst nach 1996 behoben (Zimmermann, 2009). Nach erfolgter Homogenisierung (Haimberger et al., 2012) ergibt sich das obige Bild. Knapp unterhalb der Tropopause, also zwischen 100 und 150 hPa in den Tropen und zwischen 200 und 250 hPa im globalen Mittel sowie in Österreich geht die Temperaturzunahme in die Temperaturabnahme über (Haimberger et al. 2008).

Der am Boden festgestellte stärkere Erwärmungstrend im Alpenraum verglichen mit dem globalen Mittel gleicht sich in höheren Schichten den für die mittleren Breiten sonst gefundenen Erwärmungsraten (siehe Band 1, Kapitel 1) an.

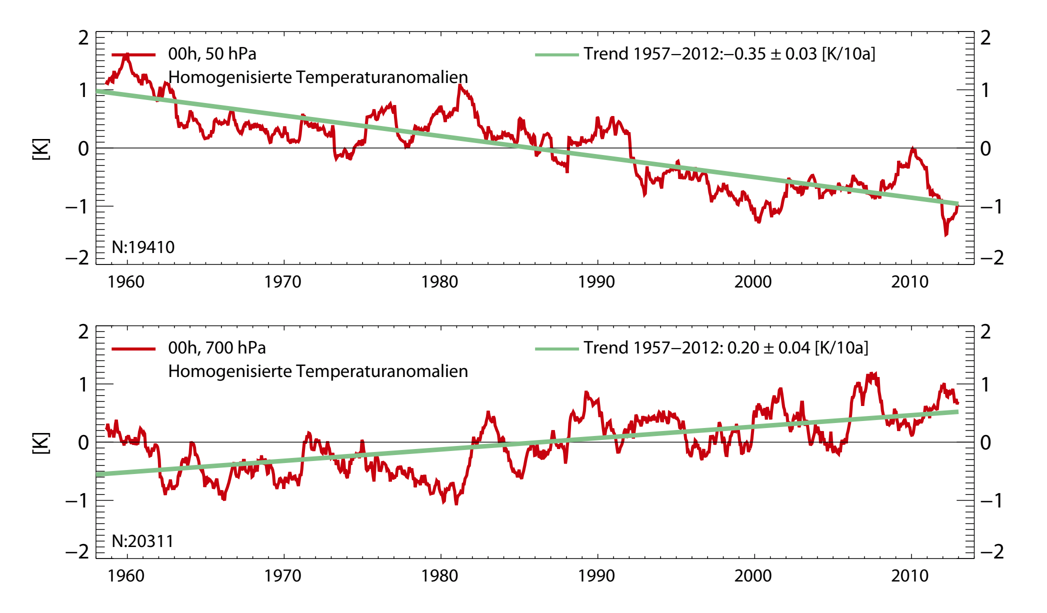


Abbildung 3.20 Anomalien der zweijährig gemittelten Temperaturzeitreihe der Radiosonde Wien (00h Aufstiege) in 50 hPa und 700 hPa. Praktisch die gleichen Trends sind auch an benachbarten Radiosondenstationen zu beobachten. Die Trends der 12-Uhr Aufstiege (nicht gezeigt) sind −0,45 K/10a bzw. 0,16 K/10a

Figure 3.20 Anomalies of 2 years averaged air temperature series of radiosonde Vienna (00 GMT launch) in 50 hPA and 700 hPa. Similar trends can be observed at neighboring radionsonde stations. Trends of 12 GMT launches (not shown here) are −0.45 K/10y or 0.16K/10y respectively

Seit 1979 stehen auch Daten von polarumlaufenden Satelliten zur Verfügung, die 2x täglich den Alpenraum überfliegen. Für eine regionale Auswertung ist dieser Zeitraum immer noch relativ kurz. Auch die Interpretation der Daten ist vor allem über gebirgigem Terrain, aufgrund der hoch variablen Bodenemissivität, mitunter schwierig. Diese Daten sind daher nur im globalen Kontext abgehandelt. Dasselbe gilt auch für GPS-RO Daten, die aufgrund ihrer absoluten Genauigkeit besonders gut für Klimaauswertungen geeignet sind. Wegen ihrer Verfügbarkeit erst ab 2001 und der geringen Datendichte liegen zurzeit Auswertungen nur auf der globalen Skala (siehe Band 1, Kapitel 1) vor.

3.3 Ausblick, Defizite, Forschungsbedarf
3.3 Outlook, deficiencies, research needs

Die zentrale Frage der *Paläoklimatologie des Pleistozäns* ist heute die Quantifizierung der Proxy-Daten, verbunden mit einer hochwertigen Chronologie. Während Temperatur-Abschätzungen z. B. mittels Pollen und anhand von Sauerstoff-Isotopendaten schon fortgeschritten sind, stellt die Rekonstruktion des Paläo-Niederschlages noch eine große methodische Herausforderung dar. Besonderes Augenmerk wird in den kommenden Jahren den sehr raschen Klimaänderungen im Pleistozän gewidmet werden. Dazu werden bevorzugt jahreszeitlich geschichtete Sedimente herangezogen, um mittels Multi-Proxy Ansätze das Prozessverständnis von Klimaänderungen auf regionaler und lokaler Ebene zu verbessern. Ein geplantes alpenweites Forschungsprogramm zur Erbohrung glazial übertiefter Täler (im Rahmen des International Continental Scientific Drilling Program) könnte wichtige Impulse für die Pleistozän-Forschung in Österreich bringen.

Die österreichischen Paläoklima-ForscherInnen sind gut vernetzt, verfügen jedoch nur in wenigen Fällen über Gruppengrößen, die international längerfristig konkurrenzfähig sind. Während die Gletscherforschung auch zum Pleistozän in Österreich traditionell gut aufgestellt ist, wäre eine Stärkung der Paläolimnologie wünschenswert. Gleiches gilt für die regionale Paläoklima-Modellierung.

Beim *Übergang zu Holozän* gibt es für die zukünftige Forschung mehrere Desiderata. Was die Gletschergeschichte betrifft, wäre in erster Linie eine weitere Verbesserung der chronologischen Basis wünschenswert. In zeitlicher Hinsicht betrifft dies vor allem das ältere Spätglazial, über das erst wenige gesicherte Daten vorliegen, während in räumlicher Hinsicht die Nordalpen nach wie vor eine terra incognita darstellen. Zu diesem Themenkreis würde auch eine Neudatierung und -analyse bestimmter klassischer Pollenprofile gehören, die vielfach zuletzt vor vier Jahrzehnten untersucht und nach damaligen Standards datiert wurden. Ein Schwerpunkt sollte weiterhin auf der Analyse durchlaufender oder zumindest langfristiger Archive liegen (z. B. Seesedimente, Höhlensinter), um möglichst sichere klimatische Angaben zu bekommen, die wiederum mit den Gletscherdaten kombiniert werden können. Der kombinierte Einsatz verschiedener Archive und unterschiedlicher Methoden sollte in jedem Fall weiter intensiviert werden.

Der Forschungsbedarf zur klimatischen Entwicklung im *Holozän* ist vielfältig. Verbesserungen des Kenntnisstandes bezogen sich bisher hauptsächlich auf den Sommer; die klimatische Entwicklung und Variabilität des Winterhalbjahres

vor dem Hintergrund der im Verhältnis zum Sommerhalbjahr gegenläufigen Entwicklung des orbitalen Klimaantriebs ist weitgehend offen. Bisheriges Wissen zur holozänen Klimaentwicklung in Österreich beruhte lange nur auf qualitativen Einschätzungen. Weitere quantifizierte und zugleich hochaufgelöste Proxy-Zeitreihen und zwar sowohl von Temperatur- als auch Niederschlagsverhältnissen, aber auch Daten aus regionalen Paläoklima-Modellierungen sind dringend nötig. Viele Klimaarchive benötigen zudem weiterhin eine Verbesserung der Chronologie. Im Hinblick auf die prognostizierte Klimaentwicklung besteht hinsichtlich klimatischer Extremereignisse im Holozän, etwa Hitzewellen oder große Niederschlagsereignisse, Forschungsbedarf, um die natürliche Variabilität auf sehr kurzen Zeitskalen quantitativ einschätzen zu können.

Für die *letzten 2000 Jahre* sind für Österreich im Vergleich zu den älteren Perioden neben den überwiegend qualitativen Proxy-Daten bereits mehrere quantitative Klimarekonstruktionen verfügbar. Solche Datensätze sind jedoch wesentlich für das Verständnis der klimasteuernden Prozesse auf Zeitskalen von Dekaden bis Jahrhunderten und leisten so einen wichtigen Beitrag zur Einordnung und Abschätzung zukünftiger klimatischer Trends. Deshalb wird derzeit eine Erweiterung dieser Datenreihen mit möglichst hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung – bis hin zur Rekonstruktion saisonaler und regionaler Trends – angestrebt. Dadurch soll neben der großräumige auch die regionale Klimaentwicklung erfasst werden. Gleichzeitig ist auch eine regelmäßige Aktualisierung bestehender Datensätze nötig, um die aktuelle Klimaentwicklung einerseits in den langfristigen Kontext zu integrieren und andererseits mit Ergebnissen regionaler Klimamodelle zu vergleichen.

Für die *instrumentelle Periode* ist ein weiterer Ausbau der HISTALP-Datenbank mit homogenisierten Klimazeitreihen in Hinblick auf zusätzliche Klimaparameter und Ausbau in Hinblick auf Zeitreihen in täglicher bzw. subtäglicher Auflösung (z.B. Wind, Feuchteparameter Schnee u.a.) notwendig. Dazu zählen auch Untersuchungen eventueller systematischer Zusammenhänge zwischen Monats- und Tageszeitreihen, Gewährleistung hoher räumlicher Auflösung durch Radar und / oder dichte Subnetze (z.B. Pachatz, 2005; Svabik, 1989), das WegenerNet (Kabas et al., 2011), die Verlängerung der zeitlichen Abdeckung der Tageszeitreihen in Österreich mit dem Ziel 1896 (Beginn der Tätigkeit von HZB und Hydrographischen Landesdiensten), insbesondere durch Digitalisierung und Homogenisierung, Neugründung bzw. nachhaltige langfristige Fortführung „junger Datensätze" wie Blitzortungsnetze (Diendorfer und Schultz, 2008), Niederschlags- und Hagelmessung.

Bei dem Themenkreis *„Klimawandel und Extremwerte"* bestehen Defizite, die hauptsächlich durch die (noch) ungenügende Aufarbeitung des existierenden Datenpotenzials begründet sind. Bis hinunter zu einer zeitlichen Auflösung von einem Monat sind diese Defizite gering, für Tages- und Subtageszeitreihen sind sie massiv. Es besteht sogar noch starker Bedarf nach weiterer Digitalisierung, vor allem für die erste Hälfte des 20. Jahrhunderts. Erst bei Vorliegen adäquater Datensätze, die neben der aktuellen anthropogenen Periode auch die Vergleichszeiträume unter überwiegend natürlichen Klimaantrieben überdecken, können auch die kleinräumigen Extremereignisse auf Trends, dekadische Anomalien und auf ihre Zuordnung zum anthropogenen Klimawandel untersucht werden.

3.4 Literaturverzeichnis
3.4 References

Aguilar, E., Auer, I., Brunet, M., Peterson, T.C., Wieringa, J., 2003. Guidelines on climate metadata and homogenization. World Climate Programme Data and Monitoring WCDMP-No. 53, WMO-TD No. 1186. World Meteorological Organization, Geneva.

Alexandersson, H., Tuomenvirta, H., Schmith, T., Iden, K., 2000. Trends of storms in NW Europe derived from an updated pressure data set. Climate Research 14, 71–73.

Alley, R.B., Ágústsdóttir, A.M., 2005. The 8k event: cause and consequences of a major Holocene abrupt climate change. Quaternary Science Reviews 24, 1123–1149. doi:10.1016/j.quascirev.2004.12.004

Andersen, K.K., Azuma, N., Barnola, J.-M., Bigler, M., Biscaye, P., Caillon, N., Chappellaz, J., Clausen, H.B., Dahl-Jensen, D., Fischer, H., Flückiger, J., Fritzsche, D., Fujii, Y., Goto-Azuma, K., Grønvold, K., Gundestrup, N.S., Hansson, M., Huber, C., Hvidberg, C.S., Johnsen, S.J., Jonsell, U., Jouzel, J., Kipfstuhl, S., Landais, A., Leuenberger, M., Lorrain, R., Masson-Delmotte, V., Miller, H., Motoyama, H., Narita, H., Popp, T., Rasmussen, S.O., Raynaud, D., Rothlisberger, R., Ruth, U., Samyn, D., Schwander, J., Shoji, H., Siggard-Andersen, M.-L., Steffensen, J.P., Stocker, T., Sveinbjörnsdóttir, A.E., Svensson, A., Takata, M., Tison, J.-L., Thorsteinsson, T., Watanabe, O., Wilhelms, F., White, J.W.C., 2004. High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period. Nature 431, 147–151. doi:10.1038/nature02805

Andersen, K.K., Svensson, A., Johnsen, S.J., Rasmussen, S.O., Bigler, M., Röthlisberger, R., Ruth, U., Siggaard-Andersen, M.-L., Peder Steffensen, J., Dahl-Jensen, D., 2006. The Greenland Ice Core Chronology 2005, 15–42ka. Part 1: constructing the time scale. Quaternary Science Reviews 25, 3246–3257. doi:10.1016/j.quascirev.2006.08.002

Appleby, P.G., 2001. Chronostratigraphic techniques in recent sediments, in: Last, W.M., Smol, J.P. (Eds.), Tracking Environmental Change Using Lake Sediments, Developments in Paleoenvironmental Research. Springer Netherlands, pp. 171–203.

Auer, I., 1992. Die Niederschlagsverhältnisse seit 1927 im Sonnblickgebiet nach Totalisatorenmessungen ergänzt durch Messergebnis-

se von Talstationen nördlich und südlich des Alpenhauptkammes. 86.–87. Jahresbericht des Sonnblickvereines für die Jahre 1988–1989, 3–31.

Auer, I., 1993. Niederschlagsschwankungen in Österreich. Seit Beginn der instrumentellen Beobachtungen durch die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. Österreichische Beiträge zu Meteorologie und Geophysik.

Auer, I., Böhm, R., 1994. Combined temperature-precipitation variations in Austria during the instrumental period. Theor Appl Climatol 49, 161–174. doi:10.1007/BF00865531

Auer, I., Böhm, R., 1998. Schneepegel- und Totalisatirenmessungen im Sonnblickgebiet. 94.–95. Jahresbericht des Sonnblick-Vereines für die Jahre 1996–1997. Eigenverlag des Sonnblick – Vereines, Wien.

Auer, I., Böhm, R., Schöner, W., Hagen, M., 1999. ALOCLIM–Austrian–Central European long-term climate-creation of a multiple homogenized long-term climate data-set, in: Proceedings of the Second Seminar for Homogenisation of Surface Climatological Data. pp. 9–13.

Auer, I., Böhm, R., Schöner, W., 2001a. Long Climatic series from Austria, in: Jones, P.D., Ogilvie, A.E.J., Davies, T.D., Briffa, K.R. (Eds.), History and Climate. Springer US, pp. 125–151.

Auer, I., Böhm, R., Schöner, W., 2001b. Austrian Long-term Climate 1767–2000: Multiple Instrumental Climate Time Series from Central Europe,[ALOCLIM 1767–2000]. Österreichische Beiträge zu Meteorologie und Geophysik Heft 25.

Auer, I., Böhm, R., Schöner, W., 2001c. Final report of EU project ALPCLIM. Chapter 3: Instrumental climate (Projektbericht). Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien.

Auer, I., Böhm, R., Leymüller, M., Schöner, W., Kaiser, A., Scheifinger, M., Langer, C., Schneider, C., Häberli, C., 2002. Das Klima des Sonnblicks: Klimaatlas und Klimatographie der GAW Station Sonnblick einschliesslich der umgebenden Gebirgsregion, Österr. Beiträge zu Meteorologie und Geophysik. , 305 S, 56 Farbkarten, 74 Farbabbildungen, 124 Schwarz-Weiß Abbildungen, 1 A3 Orthophotokarte + CD ROM. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik.

Auer, I., Böhm, R., Scheifinger, H., Ungersböck, M., Orlik, A., Jurkovic, A., 2004. Metadata and their role in homogenising, in: Proceedings of the Fourth Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases. Budapest, Hungary, pp. 17–23.

Auer, I., Böhm, R., Jurković, A., Orlik, A., Potzmann, R., Schöner, W., Ungersböck, M., Brunetti, M., Nanni, T., Maugeri, M., 2005. A new instrumental precipitation dataset for the greater alpine region for the period 1800–2002. International Journal of Climatology 25, 139–166.

Auer, I., Böhm, R., Jurkovic, A., Lipa, W., Orlik, A., Potzmann, R., Schöner, W., Ungersböck, M., Matulla, C., Briffa, K., Jones, P., Efthymiadis, D., Brunetti, M., Nanni, T., Maugeri, M., Mercalli, L., Mestre, O., Moisselin, J.-M., Begert, M., Müller-Westermeier, G., Kveton, V., Bochnicek, O., Stastny, P., Lapin, M., Szalai, S., Szentimrey, T., Cegnar, T., Dolinar, M., Gajic-Capka, M., Zaninovic, K., Majstorovic, Z., Nieplova, E., 2007. HISTALP—historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region. International Journal of Climatology 27, 17–46. doi:10.1002/joc.1377

Auer, I., Böhm, R., Schöner, W., 2009. The importance of high quality regional scientific information in coping with global climate change., in: Climate Sense, A WMO-Publication Publication for WCC-3 in Geneva, 31 Aug.–4 Sep 2009. Tudor Rose, Leicester, U.K., pp. 179–183.

Auer, I., Prettenthaler, F., Böhm, R., Proske, H., 2010. Zwei Alpentäler im Klimawandel, in: Alpine Space – Man and Environment. Innsbruck University Press, p. 11199.

Bärring, L., von Storch, H., 2004. Scandinavian storminess since about 1800. Geophysical Research Letters 31, L20202.

Becker, B., 2006. An 11,000-year German oak and pine dendrochronology for radiocarbon calibration. Radiocarbon 35, 201–213.

Berger, A., Loutre, M.F., Crucifix, M., 2003. The Earth's climate in the next hundred thousand years (100 kyr). Surveys in Geophysics 24, 117–138.

Betz, H.D., Schmidt, K., Laroche, P., Blanchet, P., Oettinger, W.P., Defer, E., Dziewit, Z., Konarski, J., 2009. LINET—An international lightning detection network in Europe. Atmospheric Research 91, 564–573. doi:10.1016/j.atmosres.2008.06.012

Beyerle, U., 1998. Climate and groundwater recharge during the last glaciation in an ice-covered region. Science 282, 731–734. doi:10.1126/science.282.5389.731

Bini, A., Schlüchter, C., Burkhalter, R., Urech, M., Schweiz, Landesgeologie, 2009. Die Schweiz während des letzteiszeitlichen Maximus (LGM) La Suisse durant le dernier maximum glaciaire = La Svizzera durante l'ultimo massimo glaciale = Switzerland during the last glacial maximum.

Björck, S., Wohlfarth, B., 2001. 14C chronostratigraphic techniques in paleolimnology, in: Last, W.M., Smol, J.P. (Eds.), Tracking Environmental Change Using Lake Sediments, Developments in Paleoenvironmental Research. Springer Netherlands, pp. 205–245.

Björck, S., Rundgren, M., Ingólfsson, Ó., Funder, S., 1997. The Preboreal oscillation around the Nordic Seas: terrestrial and lacustrine responses. Journal of Quaternary Science 12, 455-465.

Boch, R., Spötl, C., Kramers, J., 2009. High-resolution isotope records of early Holocene rapid climate change from two coeval stalagmites of Katerloch Cave, Austria. Quaternary Science Reviews 28, 2527–2538. doi:10.1016/j.quascirev.2009.05.015

Boch, R., Spötl, C., 2011. Reconstructing palaeoprecipitation from an active cave flowstone. Journal of Quaternary Science 26, 675–687. doi:10.1002/jqs.1490

Boch, R., Cheng, H., Spötl, C., Edwards, R.L., Wang, X., Häuselmann, P., 2011a. NALPS: a precisely dated European climate record 120–60 ka. Climate of the Past 7, 1247–1259. doi:10.5194/cp-7-1247-2011

Boch, R., Spötl, C., Frisia, S., 2011b. Origin and palaeoenvironmental significance of lamination in stalagmites from Katerloch Cave, Austria. Sedimentology 58, 508–531. doi: 10.1111/j.1365-3091.2010.01173.x

Böhm, R., 1992. Lufttemperaturschwankungen in Österreich seit 1775, Publikation Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. Zentralanst. für Meteorologie und Geodynamik.

Böhm, R., 2004. Die Bergstationen Obir und Villacher Alpe: eineinhalb Jahrhunderte Klimamessung und –beobachtung in den Südalpen. (No. 100. Jahresbericht des Sonnblick Vereines).

Böhm, R., 2006. ALP-IMP (EVK-CT-2002-00148) Multi-centennial climate variability in the Alps based on Instrumental data, Model simulations and Proxy data. Short version. (Final report for RTD-project). ZAMG, Central Institute for Meteorology and Geodynamics, Vienna, Austria.

Böhm, R., 2009. Geändertes Umfeld durch Klimawandel? / Modified environment due to climate change. Wildbach- und Lawinenverbau 163 73. Jg., 34–50.

Böhm, R., 2012. Changes of regional climate variability in central Europe during the past 250 years. The European Physical Journal Plus 127. doi:10.1140/epjp/i2012-12054-6

Böhm, R., Auer, I., Schöner, W., Hagen, M., 1998. Long alpine barometric time series in different altitudes as a measure for 19th / 20th century warming., in: Proceedings of the 8th Conference on Mountain Meteorology in Flagstaff, Arizona. AMS, Boston, pp. 72–76.

Böhm, R., Auer, I., Schöner, W., Ungersböck, M., Huhle, C., Nanni, T., Brunetti, M., Maugeri, M., Mercalli, L., Gajic-Capka, M., Zaninovic, K., Szalai, S., Szentimrey, T., Cegnar, T., Bochnicek, O., Begert, M., Mestre, O., Moisselin, J.-M., Müller-Westermeier, G., Majstorovic, Z., 2003. Der Alpine Niederschlagsdipol–ein dominierendes Schwankungsmuster der Klimavariabilitat in den Scales 100 km–100 Jahre. 6. Deutsche Klimatagung, Terra Nostra 2003/6, 61–65.

Böhm, R., Schöner, W., Auer, I., Hynek, B., Kroisleitner, C., Weyss, G., 2007. Gletscher im Klimawandel: vom Eis der Polargebiete zum Goldbergkees in den Hohen Tauern. ZAMG Morava.

Böhm, R., Jones, P.D., Hiebl, J., Frank, D., Brunetti, M., Maugeri, M., 2009. The early instrumental warm-bias: a solution for long central European temperature series 1760–2007. Climatic Change 101, 41–67. doi:10.1007/s10584-009-9649-4

Bond, G., Heinrich, H., Broecker, W., Labeyrie, L., McManus, J., Andrews, J., Huon, S., Jantschik, R., Clasen, S., Simet, C., Tedesco, K., Klas, M., Bonani, G., Ivy, S., 1992. Evidence for massive discharges of icebergs into the North Atlantic ocean during the last glacial period. Nature 360, 245–249. doi:10.1038/360245a0

Bortenschlager, S., Oeggl, K., Bortenschlager, S. (Eds.), 2000. The Iceman´s environment, in: The Iceman and His Natural Environment: Palaeobotanical Results. Springer, Wien, pp. 11–24.

Brázdil, R., Pfister, C., Wanner, H., Storch, H.V., Luterbacher, J., 2005. Historical climatology in Europe – the state of the art. Climatic Change 70, 363–430. doi:10.1007/s10584-005-5924-1

Breitenmoser, P., Beer, J., Brönnimann, S., Frank, D., Steinhilber, F., Wanner, H., 2012. Solar and volcanic fingerprints in tree-ring chronologies over the past 2000 years. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 313, 127–139. doi:10.1016/j.palaeo.2011.10.014

Briffa, K.R., Jones, P.D., Schweingruber, F.H., Karlén, W., Shiyatov, S.G., 1996. Tree-ring variables as proxy-climate indicators: problems with low-frequency signals, in: Climatic Variations and Forcing Mechanisms of the Last 2000 Years. Springer, pp. 9–41.

Brunetti, M., Maugeri, M., Nanni, T., Auer, I., Böhm, R., Schöner, W., 2006. Precipitation variability and changes in the greater Alpine region over the 1800–2003 period. J. Geophys. Res. 111, D11107. doi:10.1029/2005JD006674

Brunetti, M., Lentini, G., Maugeri, M., Nanni, T., Auer, I., Böhm, R., Schöner, W., 2009. Climate variability and change in the Greater Alpine Region over the last two centuries based on multivariable analysis. International Journal of Climatology 29, 2197–2225. doi:10.1002/joc.1857

Büntgen, U., Frank, D.C., Nievergelt, D., Esper, J., 2006. Summer temperature variations in the European Alps, A.D. 755–2004. Journal of Climate 19, 5606–5623. doi:10.1175/JCLI3917.1

Büntgen, U., Tegel, W., Nicolussi, K., McCormick, M., Frank, D., Trouet, V., Kaplan, J.O., Herzig, F., Heussner, K.-U., Wanner, H., 2011. 2 500 years of European climate variability and human susceptibility. Science 331, 578–582. doi: 10.1126/science.1197175

Burga, C.A., Perret, R., Vonarburg, C., 1998. Vegetation und Klima der Schweiz seit dem jüngeren Eiszeitalter = Vegetation and climate history in Switzerland during the later Pleistocene and Holocene. Ott, Thun.

Casty, C., Wanner, H., Luterbacher, J., Esper, J., Böhm, R., 2005. Temperature and precipitation variability in the European Alps since 1500. International Journal of Climatology 25, 1855–1880. doi:10.1002/joc.1216

Caussinus, H., Mestre, O., 2004. Detection and correction of artificial shifts in climate series. Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics) 53, 405–425. doi:10.1111/j.1467-9876.2004.05155.x

Chaline, J., Jerz, H., 1984. Arbeitsergebnisse der Subkommission für Europäische Quartärstratigraphie – Stratotypen des Würmglazials. Eiszeitalter und Gegenwart: Jahrbuch der Deutschen Quartärvereinigung 185–206.

Chatfield, C., 2004. The analysis of time series: an introduction. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, FL.

Chimani, B., Böhm, R., Matulla, C., Ganekind, M., 2011. Development of a longterm dataset of solid/liquid precipitation. Adv. Sci. Res. 6, 39–43. doi:10.5194/asr-6-39-2011

Chimani, B., Matulla, C., Böhm, R., Hofstätter, M., 2012. A new high resolution absolute temperature grid for the Greater Alpine Region back to 1780. International Journal of Climatology 33, 2129–2141. doi:10.1002/joc.3574

Christensen, J.H., Hewiston, B., Busuioc, A., Chen, A., Gao, X., Held, I., Jones, R., Kolli, R.K., Kwon, W.-T., Laprise, R., Magaña Rueda, V., Mearns, L., Menéndez, C.G., Räisänen, A., Rinke, A., Sarr, A., Whetton, P., 2007. Regional Climate Projections, in: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, M., Tignor, M., Miller, H.L. (Eds.), Climate Change 2007 - The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Cliamte Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Clement, A.C., Peterson, L.C., 2008. Mechanisms of abrupt climate change of the last glacial period. Reviews of Geophysics 46. doi:10.1029/2006RG000204

Coles, S., 2001. An introduction to statistical modeling of extreme values. Springer.

Cook, E.R., Briffa, K.R., Meko, D.M., Graybill, D.A., Funkhouser, G., 1995. The „segment length curse“ in long tree-ring chronology development for palaeoclimatic studies. The Holocene 5, 229–237.

Coope, G.R., Elias, S.A., 2000. The environment of Upper Palaeolithic (Magdalenian and Azilian) hunters at Hauterive-Champréveyres, Neuchâtel, Switzerland, interpreted from coleopteran remains. Journal of Quaternary Science 15, 157–175.

Corcho Alvarado, J.A., Leuenberger, M., Kipfer, R., Paces, T., Purtschert, R., 2011. Reconstruction of past climate conditions over central Europe from groundwater data. Quaternary Science Reviews 30, 3423–3429. doi:10.1016/j.quascirev.2011.09.003

Coutterand, S., Nicoud, G., 2005. Les stades de retrait du glacier de l'Arve entre le verrou de cluses et l'ombilic de Chamonix au cours du Tardiglaciaire (Vallée de l'Arve, Haute-Savoie). Quaternaire 16, 85–94.

Craddock, J.M., 1979. Methods of comparing annual rainfall records for climatic purposes. Weather 34, 332–346.

Czymzik, M., Dulski, P., Plessen, B., von Grafenstein, U., Naumann, R., Brauer, A., 2010. A 450 year record of spring-summer flood layers in annually laminated sediments from Lake Ammersee

(southern Germany). Water Resources Research 46, W11528. doi:10.1029/2009WR008360

Dai, A., Wang, J., Thorne, P.W., Parker, D.E., Haimberger, L., Wang, X.L., 2011. A New Approach to Homogenize Daily Radiosonde Humidity Data. Journal of Climate 24, 965–991. doi:10.1175/2010JCLI3816.1

Daley, R., 1993. Atmospheric data analysis. Cambridge University Press.

Dansgaard, W., Johnsen, S.J., Clausen, H.B., Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N.S., Hammer, C.U., Hvidberg, C.S., Steffensen, J.P., Sveinbjörnsdottir, A.E., Jouzel, J., 1993. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. Nature 364, 218–220.

Davis, B.A.S., Brewer, S., Stevenson, A.C., Guiot, J., 2003. The temperature of Europe during the Holocene reconstructed from pollen data. Quaternary Science Reviews 22, 1701–1716. doi:10.1016/S0277-3791(03)00173-2

Davison, A.C., Smith, R.L., 1990. Models for exceedances over high thresholds. Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological) 393–442.

Debret, M., Chapron, E., Desmet, M., Rolland-Revel, M., Magand, O., Trentesaux, A., Bout-Roumazeille, V., Nomade, J., Arnaud, F., 2010. North western Alps Holocene paleohydrology recorded by flooding activity in Lake Le Bourget, France. Quaternary Science Reviews 29, 2185–2200. doi:10.1016/j.quascirev.2010.05.016

Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A.J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M.A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A.C.M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A.J., Haimberger, L., Healy, S.B., Hersbach, H., Hólm, E.V., Isaksen, L., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A.P., Monge-Sanz, B.M., Morcrette, J.-J., Park, B.-K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.-N., Vitart, F., 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 137, 553–597. doi:10.1002/qj.828

Dehnert, A., Preusser, F., Kramers, J.D., Akçar, N., Kubik, P.W., Reber, R., Schlüchter, C., 2010. A multi-dating approach applied to proglacial sediments attributed to the Most Extensive Glaciation of the Swiss Alps. Boreas 39, 620–632. doi:10.1111/j.1502-3885.2010.00146.x

Denton, G.H., Alley, R.B., Comer, G.C., Broecker, W.S., 2005. The role of seasonality in abrupt climate change. Quaternary Science Reviews 24, 1159–1182. doi:10.1016/j.quascirev.2004.12.002

Denton, G.H., Broecker, W.S., Alley, R.B., 2006. The mystery interval 17.5 to 14.5 kyrs ago. PAGES news 14, 14–16.

Diendorfer, G., Schulz, W., 2008. ALDIS Austrian Lightning Detection and Information System 1992–2008. e & i Elektrotechnik und Informationstechnik 125, 209–213. doi:10.1007/s00502-008-0530-3

Dobrovolný, P., Moberg, A., Brázdil, R., Pfister, C., Glaser, R., Wilson, R., Engelen, A. van, Limanówka, D., Kiss, A., Halíčková, M., Macková, J., Riemann, D., Luterbacher, J., Böhm, R., 2010. Monthly, seasonal and annual temperature reconstructions for Central Europe derived from documentary evidence and instrumental records since AD 1500. Climatic Change 101, 69–107. doi:10.1007/s10584-009-9724-x

Dorigo, W.A., Wagner, W., Hohensinn, R., Hahn, S., Paulik, C., Xaver, A., Gruber, A., Drusch, M., Mecklenburg, S., van Oevelen, P., Robock, A., Jackson, T., 2011. The International Soil Moisture Network: a data hosting facility for global in situ soil moisture measurements. Hydrology and Earth System Sciences 15, 1675–1698. doi:10.5194/hess-15-1675-2011

Drescher-Schneider, R., 2001. Die Vegetations-und Klimaentwicklung im Riß / Würm-Interglazial und im Früh-und Mittelwürm in der Umgebung von Mondsee. Ergebnisse der pollenanalytischen Untersuchungen, in: Van Husen, D. (Ed.), Klimaentwicklung im Riss / Würm Interglazial (Eem) und Frühwürm (Sauerstoffisotopenstufe 6-3) in den Ostalpen, Mitteilungen der Kommission für Quartärforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften. Verlag der Österreichische Akademie der Wissenschaften, Wien, Austria, pp. 39–92.

Drescher-Schneider, R., 2007. Pollenanalytische Untersuchungen im Königreich, Dachstein-Ostplateau (Österreich)., in: Herbert, B., Kienast, G., Mandl, F. (Eds.), Königreich-Alm – Dachsteingebirge: 3500 Jahre Almwirtschaft zwischen Gröbming und Hallstatt, Forschungsberichte der ANISA. Verein für Alpine Forschungen, pp. 119–130.

Drescher-Schneider, R., Kellerer-Pirklbauer, A., 2008. Gletscherschwund einst und heute – Neue Ergebnisse zur holozänen Vegetations- und Gletschergeschichte der Pasterze (Hohe Tauern, Österreich). Abhandlungen der Geologischen Bundesanstalt 62, 45–51.

Dutton, A., Lambeck, K., 2012. Ice volume and sea level during the last interglacial. Science 337, 216–219. doi:10.1126/science.1205749

Efthymiadis, D., Jones, P.D., Briffa, K.R., Auer, I., Böhm, R., Schöner, W., Frei, C., Schmidli, J., 2006. Construction of a 10-min-gridded precipitation data set for the Greater Alpine Region for 1800–2003. Journal of Geophysical Research 111, D01105. doi:10.1029/2005JD006120

Efthymiadis, D., Jones, P.D., Briffa, K.R., Böhm, R., Maugeri, M., 2007. Influence of large-scale atmospheric circulation on climate variability in the Greater Alpine Region of Europe. Journal of Geophysical Research 112, D12104. doi:10.1029/2006JD008021

Ehlers, J., 2011. Das Eiszeitalter. Springer Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Deutschland.

Ehlers, J., Gibbard, P.L. (Eds.), 2004. Quaternary Glaciations-Extent and Chronology: Part I: Europe. Elsevier, Amsterdam.

Fairchild, I.J., Baker, A., 2012. Speleothem Science: From Process to Past Environments, 1 edition. ed. Wiley-Blackwell, Hoboken, N.J.

Federici, P.R., Granger, D.E., Pappalardo, M., Ribolini, A., Spagnolo, M., Cyr, A.J., 2008. Exposure age dating and Equilibrium Line Altitude reconstruction of an Egesen moraine in the Maritime Alps, Italy. Boreas 37, 245–253. doi:10.1111/j.1502-3885.2007.00018.x

Fink, J., Kukla, G.J., 1977. Pleistocene climates in Central Europe: at least 17 interglacials after the Olduvai event. Quaternary Research 7, 363–371.

Fliri, F., 1973. Beiträge zur Geschichte der alpinen Würmvereisung: Forschungen am Bänderton von Baumkirchen (Inntal, Nordtirol). Zeitschrift für Geomorphologie, Supplement 16. 1–14.

Fliri, F., Bortenschlager, S., Felber, H., Heissel, W., Hilscher, H., Resch, W., 1970. Der Bänderton von Baumkirchen (Inntal, Tirol). Eine neue Schlüsselstelle zur Kenntnis der Würm-Vereisung der Alpen. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie 6, 5–35.

Fliri, F., Felber, H., Hilscher, H., 1972. Weitere Ergenbnisse der Forschung am Bänderton von Baumkirchen (Inntal, Tirol). Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie 8, 203–213.

Florineth, D., Schlüchter, C., 2000. Alpine evidence for atmospheric circulation patterns in Europe during the Last Glacial Maximum. Quaternary Research 54, 295–308. doi:10.1006/qres.2000.2169

Fohlmeister, J., Vollweiler, N., Spötl, C., Mangini, A., 2013. COMNISPA II: Update of a mid-European isotope climate record, 11 ka to present. The Holocene 23, 749–754. doi:10.1177/0959683612465446

Fraedrich, R., 1979. Spaet-und postglaziale Gletscherschwankungen in der Ferwallgruppe (Tirol-Vorarlberg) (Düsseldorfer Geographische Schriften No. 12). Heinrich-Heine-Universitaet Düsseldorf, Geographischen Institut.

Francus, P., Lamb, H., Nakagawa, T., Marshall, M., Brown, E., 2009. The potential of high-resolution X-ray fluorescence core scanning: applications in paleolimnology. PAGES (Past Global Changes) News 17, 93–95.

Frauenfelder, R., Haeberli, W., Hoelzle, M., Maisch, M., 2001. Using relict rockglaciers in GIS-based modelling to reconstruct Younger Dryas permafrost distribution patterns in the Err-Julier area, Swiss Alp. Norsk Geografisk Tidsskrift 55, 195–202.

Frei, C., Schär, C., 2001. Detection probability of trends in rare events: Theory and application to heavy precipitation in the Alpine region. Journal of Climate 14, 1568–1584. doi:10.1175/1520-0442(2001)014<1568:DPOTIR>2.0.CO;2

Frisia, S., Borsato, A., 2010. Karst, in: A.M. Alonso-Zarza and L.H. Tanner (Ed.), Developments in Sedimentology. Elsevier, pp. 269–318.

Fritsch, C., 1850. Anleitung zur Ausführung von Beobachtungen über die an eine jährliche Periode gebundenen Erscheinungen im Pflanzenreich (No. Maiheft Band IV, 1–5), Sitzungsbericht der mathem.-naturw. Classe der k. Akademie der Wissenschaften.

Fritsch, C., 1854. Instruktion für Vegetationsbeobachtungen. Jahrbücher der k.k. Centralanstalt für Meteorologie und Erdmagnetismus, II. Band, Jg 1850, Kaiserlich Königliche Hof- und Staatsdruckerei Wien, 248–250 II. Band.

Fritsch, C., 1858. Instruktion für Vegetationsbeobachtungen. Jahrbücher der k.k. Centralanstalt für Meteorologie und Erdmagnetismus, V. Band, Jg 1853, Kaiserlich Königliche Hof- und Staatsdruckerei Wien, 51–62 V. Band.

Fritsch, C., 1863. Instruktion für Vegetationsbeobachtungen (No. Sitzung vom 7. Juli 1859.), Sitzungsbericht der mathem.-naturw. Classe der k. Akademie der Wissenschaften.

Gao, C., Robock, A., Ammann, C., 2008. Volcanic forcing of climate over the past 1500 years: An improved ice core-based index for climate models. Journal of Geophysical Research 113, D23111. doi:10.1029/2008JD010239

Gerersdorfer, T., Formayer, H., Moshammer, H., Frank, A., Haas, P., Leitner, B., 2006. Untersuchung zur nächtlichen Abkühlung in einem sich ändernden Klima (Endbericht zum Projekt StartClim2005.A1b, Teilprojekt von StartClim2005 „Klimawandel und Gesundheit" No. StartClim2005.A1b). Institut für Meteorologie Universität für Bodenkultur, Medizinische Universität Wien, ZPH Institut für Umwelthygiene, Wien.

Glaser, R., Riemann, D., 2009. A thousand-year record of temperature variations for Germany and Central Europe based on documentary data. Journal of Quaternary Science 24, 437–449. doi:10.1002/jqs.1302

Glaser, R., Riemann, D., Schönbein, J., Barriendos, M., Brázdil, R., Bertolin, C., Camuffo, D., Deutsch, M., Dobrovolný, P., Engelen, A. van, Enzi, S., Halíčková, M., Koenig, S.J., Kotyza, O., Limanówka, D., Macková, J., Sghedoni, M., Martin, B., Himmelsbach, I., 2010. The variability of European floods since AD 1500. Climatic Change 101, 235–256. doi:10.1007/s10584-010-9816-7

Goehring, B.M., Schaefer, J.M., Schluechter, C., Lifton, N.A., Finkel, R.C., Jull, A.J.T., Akçar, N., Alley, R.B., 2011. The Rhone Glacier was smaller than today for most of the Holocene. Geology 39, 679–682. doi:10.1130/G32145.1

Gross, G., Kerschner, H., Patzelt, G., 1977. Methodische Untersuchungen über die Schneegrenze in alpinen Gletschergebieten. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie 12, 223–251.

Gruber, C., Haimberger, L., 2008. On the homogeneity of radiosonde wind time series. Meteorologische Zeitschrift 17, 631–643. doi:10.1127/0941-2948/2008/0298

Gudlat, D., Claus, C., Streicher, O., 2003. Benutzerhandbuch Administrationskomponente QualiMET-Admin (Benutzerhandbuch). Deutscher Wetterdienst DWD.

Habersack, H., Moser, A., 2003. Ereignisdokumentation Hochwasser August 2002, Plattform Hochwasser (No. 1). ZENAR, Universität für Bodenkultur Wien, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.

Haesaerts, P., Damblon, F., Bachner, M., Trnka, G., 1996. Revised stratigraphy and chronology of the Willendorf II sequence, Lower Austria. Archaeologia Austriaca 80, 25–42.

Haimberger, L., Tavolato, C., Sperka, S., 2008. Toward elimination of the warm bias in historic radiosonde temperature records-Some new results from a comprehensive intercomparison of upper-air data. Journal of Climate 21, 4587–4606.

Haimberger, L., Tavolato, C., Sperka, S., 2012. Homogenization of the global radiosonde temperature dataset through combined comparison with reanalysis background series and neighboring stations. Journal of Climate 25, 8108–8131. doi:10.1175/JCLI-D-11-00668.1

Haslinger, K., Chimani, B., Böhm, R., 2011. 200 years of liquid and solid precipitation in major river systems originating in the Greater Alpine Region. Geophysical Research Abstracts, EGU 2012-1798, EGU General Assembly 2011.

Hays, J.D., Imbrie, J., Shackleton, N.J., 1976. Variations in the Earth's orbit: Pacemaker of the ice ages. Science 194, 1121–1132. doi:10.1126/science.194.4270.1121

Heiri, O., Lotter, A.F., Hausmann, S., Kienast, F., 2003. A chironomid-based Holocene summer air temperature reconstruction from the Swiss Alps. The Holocene 13, 477–484. doi:10.1191/0959683603hl640ft

Heiri, O., Brooks, S.J., Birks, H.J.B., Lotter, A.F., 2011. A 274-lake calibration data-set and inference model for chironomid-based summer air temperature reconstruction in Europe. Quaternary Science Reviews 30, 3445–3456. doi:10.1016/j.quascirev.2011.09.006

Helama, S., Timonen, M., Lindholm, M., Meriläinen, J., Eronen, M., 2005. Extracting long-period climate fluctuations from tree-ring chronologies over timescales of centuries to millennia. International Journal of Climatology 25, 1767–1779. doi:10.1002/joc.1215

Hemming, S.R., 2004. Heinrich events: Massive late Pleistocene detritus layers of the North Atlantic and their global climate imprint. Reviews of Geophysics 42, 1–43. doi:10.1029/2003RG000128

Hertl, A., Kerschner, H., 2001. Untersuchungen zur spätglazialen und frühholozänen Gletscher-und Klimageschichte in der österreichischen Silvrettagruppe (Jahresbericht 1999–2000). Innsbrucker Geographische Gesellschaft.

Hiebl, J., Hofstätter, M., 2012. No increase in multi-day temperature variability in Austria following climate warming. Climatic Change 113, 733–750. doi:10.1007/s10584-011-0389-x

HISTALP, 2012. Historical Instrumental Climatologiocal Surface Time Series of the Greater Alpine Region [WWW Document]. URL http://www.zamg.ac.at/histalp/ (accessed 6.11.14).

Hoinkes, H., 1970. Methoden und Möglichkeiten von Massenhaushaltsstudien auf Gletschern: Ergebnisse der Messreihe Hintereisferner (Ötztaler Alpen) 1953–1968. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie 37–90.

Holzhauser, H., Magny, M.J., Zumbühl, H.J., 2005. Glacier and lake-level variations in west-central Europe over the last 3500 years. The Holocene 15, 789–801. doi:10.1191/0959683605hl853ra

Holzkämper, S., Mangini, A., Spötl, C., Mudelsee, M., 2004. Timing and progression of the Last Interglacial derived from a high alpine stalagmite. Geophysical Research Letters 31. doi:10.1029/2003GL019112

Holzkämper, S., Spötl, C., Mangini, A., 2005. High-precision constraints on timing of Alpine warm periods during the middle to late Pleistocene using speleothem growth periods. Earth and Planetary Science Letters 236, 751–764. doi:10.1016/j.epsl.2005.06.002

Hormes, A., Müller, B.U., Schlüchter, C., 2001. The Alps with little ice: evidence for eight Holocene phases of reduced glacier extent in the Central Swiss Alps. The Holocene 11, 255–265. doi:10.1191/095968301675275728

Huber, C., Leuenberger, M., Spahni, R., Flückiger, J., Schwander, J., Stocker, T.F., Johnsen, S., Landais, A., Jouzel, J., 2006. Isotope calibrated Greenland temperature record over Marine Isotope Stage 3 and its relation to CH4. Earth and Planetary Science Letters 243, 504–519. doi:10.1016/j.epsl.2006.01.002

Huber, K., Weckström, K., Drescher-Schneider, R., Knoll, J., Schmidt, J., Schmidt, R., 2010. Climate changes during the last glacial termination inferred from diatom-based temperatures and pollen in a sediment core from Längsee (Austria). Journal of Paleolimnology 43, 131–147. doi 10.1007/s10933-009-9322-y

Ilyashuk, B., Gobet, E., Heiri, O., Lotter, A.F., van Leeuwen, J.F.N., van der Knaap, W.O., Ilyashuk, E., Oberli, F., Ammann, B., 2009. Lateglacial environmental and climatic changes at the Maloja Pass, Central Swiss Alps, as recorded by chironomids and pollen. Quaternary Science Reviews 28, 1340–1353. doi:10.1016/j.quascirev.2009.01.007

Ilyashuk, E.A., Koinig, K.A., Heiri, O., Ilyashuk, B.P., Psenner, R., 2011. Holocene temperature variations at a high-altitude site in the Eastern Alps: a chironomid record from Schwarzsee ob Sölden, Austria. Quaternary Science Reviews 30, 176–191. doi:10.1016/j.quascirev.2010.10.008

IPCC, 2012. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: A Special Report of Woking Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.

Ivy-Ochs, S., Kerschner, H., Kubik, P.W., Schlüchter, C., 2006. Glacier response in the European Alps to Heinrich Event 1 cooling: the Gschnitz stadial. Journal of Quaternary Science 21, 115–130. doi:10.1002/jqs.955

Ivy-Ochs, S., Kerschner, H., Maisch, M., Christl, M., Kubik, P.W., Schlüchter, C., 2009. Latest Pleistocene and Holocene glacier variations in the European Alps. Quaternary Science Reviews 28, 2137–2149. doi:10.1016/j.quascirev.2009.03.009

Ivy-Ochs, S., Kerschner, H., Reuther, A., Preusser, F., Heine, K., Maisch, M., Kubik, P.W., Schlüchter, C., 2008. Chronology of the last glacial cycle in the European Alps. Journal of Quaternary Science 23, 559–573. doi:10.1002/jqs.1202

Ivy-Ochs, S., Schäfer, J., Kubik, P.W., Synal, H.-A., Schlüchter, C., 2004. Timing of deglaciation on the northern Alpine foreland (Switzerland). Eclogae Geologicae Helvetiae 97, 47–55. doi:10.1007/s00015-004-1110-0

Jansen, E., Overpeck, J., Briffa, K.R., Duplessy, J.C., Joos, F., Masson-Delmotte, V., Olago, D., Otto-Bliesner, B., Peltier, W.R., Rahmstorf, S., Ramesh, R., Raynaud, D., Rind, D., Solomina, O., Villalba, R., Zhang, D., 2007. Palaeoclimate. Chapter 6.

Jenk, T.M., Szidat, S., Bolius, D., Sigl, M., Gäggeler, H.W., Wacker, L., Ruff, M., Barbante, C., Boutron, C.F., Schwikowski, M., 2009. A novel radiocarbon dating technique applied to an ice core from the Alps indicating late Pleistocene ages. Journal of Geophysical Research 114. doi:10.1029/2009JD011860

Joerin, U.E., Stocker, T.F., Schlüchter, C., 2006. Multicentury glacier fluctuations in the Swiss Alps during the Holocene. The Holocene 16, 697–704. doi:10.1191/0959683606hl964rp

Joerin, U.E., Nicolussi, K., Fischer, A., Stocker, T.F., Schlüchter, C., 2008. Holocene optimum events inferred from subglacial sediments at Tschierva Glacier, Eastern Swiss Alps. Quaternary Science Reviews 27, 337–350. doi:10.1016/j.quascirev.2007.10.016

Jones, P.D., Lister, D.h., Osborn, T.J., Harpham, C., Salmon, M., Morice, C.P., 2012. Hemispheric and large-scale land-surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2010. Journal of Geophysical Research 117, D05127. doi:10.1029/2011JD017139

Jurkovic, A., 2008. Anleitung zur Qualitätsprüfung mittels Softwarepaket ProClim – Dokumentation für internen Gebrauch.

Kabas, T., 2012. WegenerNet Klimastationsnetz Region Feldbach: Experimenteller Aufbau und hochauflösende Daten für die Klima- und Umweltforschung (Wissenschaftlicher Bericht No. 47). Wegener Center Verlag, Graz.

Kabas, T., Foelsche, U., Kirchengast, G., 2011. Seasonal and Annual Trends of Temperature and Precipitation within 1951/19712007 in South-Eastern Styria, Austria. Meteorologische Zeitschrift 20, 277–289. doi:10.5194/asr-6-49-2011

Kabas, T., Kirchengast, G., 2009. WegenerNet – Klimastationsnetz Region Feldbach: Ein Pionoerexperiment. ÖGM Bulletin 14–19.

Kabas, T., Leuprecht, A., Bichler, C., Kirchengast, G., 2011. WegenerNet climate station network region Feldbach, Austria: network structure, processing system, and example results. Advances in Science and Research 6, 49–54. doi:10.5194/asr-6-49-2011

Kaltenrieder, P., Belis, C.A., Hofstetter, S., Ammann, B., Ravazzi, C., Tinner, W., 2009. Environmental and climatic conditions at a potential Glacial refugial site of tree species near the Southern Alpine glaciers. New insights from multiproxy sedimentary studies at Lago della Costa (Euganean Hills, Northeastern Italy). Quaternary Science Reviews 28, 2647–2662. doi:10.1016/j.quascirev.2009.05.025

Kamenik, C., Schmidt, R., 2005. Chrysophyte resting stages: a tool for reconstructing winter / spring climate from Alpine lake sediments. Boreas 34, 477–489. doi:10.1080/03009480500231468

Kamenik, C., Van der Knaap, W.O., Van Leeuwen, J.F.N., Goslar, T., 2009. Pollen / climate calibration based on a near-annual peat sequence from the Swiss Alps. Journal of Quaternary Science 24, 529–546. doi:10.1002/jqs.1266

Kann, A., Haiden, T., von der Emde, K., Gruber, C., Kabas, T., Leuprecht, A., Kirchengast, G., 2011. Verification of Operational Analyses Using an Extremely High-Density Surface Station Network. Weather and Forecasting 26, 572–578. doi:10.1175/WAF-D-11-00031.1

Kaser, G., 2001. Glacier-climate interaction at low latitudes. Journal of Glaciology 47, 195–204. doi:10.3189/172756501781832296

Kerschner, H., 2005. Glacier-climate models as palaeoclimatic information sources: examples from the alpine Younger Dryas period, in: Huber, U.M., Bugmann, H.K.M., Reasoner, M.A. (Eds.), Global Change and Mountain Regions. Springer-Verlag, Berlin / Heidelberg, pp. 73–81.

Kerschner, H., Hertl, A., Gross, G., Ivy-Ochs, S., Kubik, P.W., 2006. Surface exposure dating of moraines in the Kromer valley (Silvretta Mountains, Austria) – evidence for glacial response to the 8.2 ka event in the Eastern Alps? The Holocene 16, 7–15. doi:10.1196/0959683606hl902rp

Kerschner, H., Ivy-Ochs, S., 2007. Palaeoclimate from glaciers: Examples from the Eastern Alps during the Alpine Lateglacial and early Holocene. Global and Planetary Change 60, 58–71. doi:10.1016/j.gloplacha.2006.07.034

Kerschner, H., Kaser, G., Sailer, R., 2000. Alpine Younger Dryas glaciers as paleo- precipitation gauges. Annals of Glaciology 31, 80–84.

Kirchengast, G., Kabas, T., Binder, S., Leuprecht, A., Bichler, C., 2008. Pionierexperiment WegenerNet Klimastationsnetz: Ein neuartiges Messnetz in der Region Feldbach (Steiermark / Österreich) zur Beobachtung von Wetter und Klima mit sehr hoher Auflösung (No. 23), Wissenschaftlicher Bericht. Wegener Center, Graz, Austria.

Kirchengast, G., Steininger, K., Gobiet, A., Steiner, A., 2011. Klimawandel messbar machen und unsere Antworten gestalten (No. 3/2011), Soziale Technik. Wegener Zentrum für Klima und Globalen Wandel Karl-Franzens-Universität Graz, Graz.

Kirchengast, G., Kabas, T., Leuprecht, A., Bichler, C., Truhetz, H., 2013. WegenerNet: A pioneering high-resolution network for monitoring weather and climate. Bulletin of the American Meteorological Society 95, 227–242. doi:10.1175/BAMS-D-11-00161.1

Klasen, N., Fiebig, M., Preusser, F., Reitner, J.M., Radtke, U., 2007. Luminescence dating of proglacial sediments from the Eastern Alps. Quaternary International 164-165, 21–32. doi:10.1016/j.quaint.2006.12.003

Klotz, S., Müller, U., Mosbrugger, V., de Beaulieu, J.-L., Reille, M., 2004. Eemian to early Würmian climate dynamics: history and pattern of changes in Central Europe. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 211, 107–126. doi:10.1016/j.palaeo.2004.04.009

Kuhlemann, J., Rohling, E.J., Krumrei, I., Kubik, P., Ivy-Ochs, S., Kucera, M., 2008. Regional synthesis of Mediterranean atmospheric circulation during the Last Glacial Maximum. Science 321, 1338–1340. doi:10.1126/science.1157638

Kuhn, M., 1981. Climate and glaciers. International Association of Hydrological Sciences Publication 131, 3–20.

Kuhn, M., 1989. The response of the equilibrium line altitude to climatic fluctuations: theory and observations, in: Oerlemans, J. (Ed.), Glacier Fluctuations and Climatic Change. Proceedings of the Symposium on Glacier Fluctuations and Climatic Change, Held at Amsterdam, 1–5 June 1987, Glaciology and Quaternary Geology. Kluwer, Dordrecht, pp. 407–417.

Kyselý, J., 2004. Mortality and displaced mortality during heat waves in the Czech Republic. International Journal of Biometeorology 49, 91–97. doi:10.1007/s00484-004-0218-2

Lachniet, M.S., 2009. Climatic and environmental controls on speleothem oxygen-isotope values. Quaternary Science Reviews 28, 412–432. doi:10.1016/j.quascirev.2008.10.021

Laîné, A., Kageyama, M., Salas-Mélia, D., Voldoire, A., Rivière, G., Ramstein, G., Planton, S., Tyteca, S., Peterschmitt, J.Y., 2008. Northern hemisphere storm tracks during the last glacial maximum in the PMIP2 ocean-atmosphere coupled models: energetic study, seasonal cycle, precipitation. Climate Dynamics 32, 593–614. doi:10.1007/s00382-008-0391-9

Lambeck, K., Esat, T.M., Potter, E.-K., 2002. Links between climate and sea levels for the past three million years. Nature 419, 199–206. doi:10.1038/nature01089

Larocque-Tobler, I., Grosjean, M., Heiri, O., Trachsel, M., Kamenik, C., 2010. Thousand years of climate change reconstructed from chironomid subfossils preserved in varved lake Silvaplana, Engadine, Switzerland. Quaternary Science Reviews 29, 1940–1949. doi:10.1016/j.quascirev.2010.04.018

Larocque-Tobler, I., Stewart, M.M., Quinlan, R., Trachsel, M., Kamenik, C., Grosjean, M., 2012. A last millennium temperature reconstruction using chironomids preserved in sediments of anoxic Seebergsee (Switzerland): consensus at local, regional and Central European scales. Quaternary Science Reviews 41, 49–56. doi:10.1016/j.quascirev.2012.03.010

Larsen, L.B., Vinther, B.M., Briffa, K.R., Melvin, T.M., Clausen, H.B., Jones, P.D., Siggaard-Andersen, M.-L., Hammer, C.U., Eronen, M., Grudd, H., Gunnarson, B.E., Hantemirov, R.M., Naurzbaev, M.M., Nicolussi, K., 2008. New ice core evidence for a volcanic cause of the AD 536 dust veil. Geophysical Research Letters 35, L04708. doi:10.1029/2007GL032450

Lauscher, F., 1961. Die Totalisatorennetze Österreichs. 54.-57. Jahresbericht des Sonnblick-Vereines für die Jahre 1956–1959. Kommissionsverlag von Springer Verlag, Wien.

Lauterbach, S., Brauer, A., Andersen, N., Danielopol, D.L., Dulski, P., Hüls, M., Milecka, K., Namiotko, T., Obremska, M., Von Grafenstein, U., Declakes Participants, 2011. Environmental responses to Lateglacial climatic fluctuations recorded in the sediments of pre-Alpine Lake Mondsee (northeastern Alps). Journal of Quaternary Science 26, 253–267. doi:10.1002/jqs.1448

Lauterbach, S., Chapron, E., Brauer, A., Hüls, M., Gilli, A., Arnaud, F., Piccin, A., Nomade, J., Desmet, M., Grafenstein, U. von, Declakes Participants, 2012. A sedimentary record of Holocene surface runoff events and earthquake activity from Lake Iseo (Southern Alps, Italy). The Holocene 22, 749–760. doi:10.1177/0959683611430340

Leemann, A., Niessen, F., 1994. Holocene glacial activity and climatic variations in the Swiss Alps: reconstructing a continuous record from proglacial lake sediments. The Holocene 4, 259–268. doi:10.1177/095968369400400305

Leesch, D., Müller, W., Nielsen, E., Bullinger, J., 2012. The Magdalenian in Switzerland: Re-colonization of a newly accessible landscape. Quaternary International 272-273, 191–208. doi:10.1016/j.quaint.2012.04.010

Lipa, W., Jurkovic, A., 2012. Arbeitsanweisung OFFLINE Klimadatenprüfung. Dokumentation für internen Gebrauch. ZAMG

Lisiecki, L.E., Raymo, M.E., 2005. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic δ18O records. Paleoceanography 20. doi:10.1029/2004PA001071

Lotter, A.F., Birks, H.J.B., Eicher, U., Hofmann, W., Schwander, J., Wick, L., 2000. Younger Dryas and Allerød summer temperatures at Gerzensee (Switzerland) inferred from fossil pollen and cladoceran assemblages. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 159, 349–361. doi:10.1016/S0031-0182(00)00093-6

Lotter, A.F., Birks, H.J.B., Hofmann, W., Marchetto, A., 1997. Modern diatom, cladocera, chironomid, and chrysophyte cyst assemblages as quantitative indicators for the reconstruction of past environmental conditions in the Alps. I. Climate. Journal of Paleolimnology 18, 395–420. doi:10.1023/A:1007982008956

Lotter, A.F., Heiri, O., Brooks, S., van Leeuwen, J.F., Eicher, U., Ammann, B., 2012. Rapid summer temperature changes during Termination 1a: high-resolution multi-proxy climate reconstructions from Gerzensee (Switzerland). Quaternary Science Reviews 36, 103–113. doi:10.1016/j.quascirev.2010.06.022

Luetscher, M., Dublyansky, Y., Hellstrom, J., Müller, W., Spötl, C., 2011. Quantifying the Younger Dryas climate using alpine speleothems, in: Wulf, S., Brauer, A. (Eds.), INTIMATE. INTegrating Ice Core, MArine and TErrestrial Records: Towards High -Precision Chronologies, Abstracts Volume INTIMATE Workshop Funded by EU COST Action ES0907. Potsdam, Germany. doi:10.2312/GFZ.b103-11019

Luterbacher, J., Rickli, R., Xoplaki, E., Tinguely, C., Beck, C., Pfister, C., Wanner, H., 2001. The late Maunder Minimum (1675–1715) – a key period for studying decadal scale climatic change in Europe. Climatic Change 49, 441–462. doi:10.1023/A:1010667524422

Luterbacher, J., Dietrich, D., Xoplaki, E., Grosjean, M., Wanner, H., 2004. European seasonal and annual temperature variability, trends, and extremes since 1500. Science 303, 1499–1503. doi:10.1126/science.1093877

Luzian, R., Haas, J.N., Nicolussi, K., Pindur, P., Sailer, R., Zwerger, P., 2011. Holozänes Lawinengeschehen und „Global Warming. Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz 102–117.

Magny, M., 2004. Holocene climate variability as reflected by mid-European lake-level fluctuations and its probable impact on prehistoric human settlements. Quaternary International 113, 65–79. doi:10.1016/S1040-6182(03)00080-6

Magny, M., Galop, D., Bellintani, P., Desmet, M., Didier, J., Haas, J.N., Martinelli, N., Pedrotti, A., Scandolari, R., Stock, A., Vannière, B., 2009. Late-Holocene climatic variability south of the Alps as recorded by lake-level fluctuations at Lake Ledro, Trentino, Italy. The Holocene 19, 575–589. doi:10.1177/0959683609104032

Magny, M., Joannin, S., Galop, D., Vannière, B., Haas, J.N., Bassetti, M., Bellintani, P., Scandolari, R., Desmet, M., 2012. Holocene palaeohydrological changes in the northern Mediterranean borderlands as reflected by the lake-level record of Lake Ledro, northeastern Italy. Quaternary Research 77, 382–396. doi:10.1016/j.yqres.2012.01.005

Mangini, A., Spötl, C., Verdes, P., 2005. Reconstruction of temperature in the Central Alps during the past 2000 yr from a δ18O stalagmite record. Earth and Planetary Science Letters 235, 741–751. doi:10.1016/j.epsl.2005.05.010

Martin-Puertas, C., Matthes, K., Brauer, A., Muscheler, R., Hansen, F., Petrick, C., Aldahan, A., Possnert, G., van Geel, B., 2012. Regional atmospheric circulation shifts induced by a grand solar minimum. Nature Geoscience 5, 397–401. doi:10.1038/ngeo1460

Matulla, C., Auer, I., Böhm, R., Ungersböck, M., Schöner, W., Wagner, S., Zorita, E., 2005. Outstanding Past Decadal Scale Climate Events in the Greater Alpine Region Analysed by 250 Years Data and Model Runs, GKSS report. GKSS-Forschungszentrum, Geesthacht.

Matulla, C., Schöner, W., Alexandersson, H., Storch, H., Wang, X.L., 2008. European storminess: late nineteenth century to present. Climate Dynamics 31, 125–130. doi:10.1007/s00382-007-0333-y

Maurer, C., Hammerl, C., Koch, E., Hammerl, T., Pokorny, E., 2011. Extreme grape harvest data of Austria, Switzerland and France from AD 1523 to 2007 compared to corresponding instrumental / reconstructed temperature data and various documentary sources. Theoretical and Applied Climatology 106, 55–68. doi:10.1007/s00704-011-0410-3

Maurer, C., Koch, E., Hammerl, C., Hammerl, T., Pokorny, E., 2009. BACCHUS temperature reconstruction for the period 16th to 18th centuries from Viennese and Klosterneuburg grape harvest dates. Journal of Geophysical Research 114. doi:10.1029/2009JD011730

Mayr, F., Heuberger, H., 1968. Type areas of Lateglacial and Postglacial deposits in Tyrol, Eastern Alps., in: Richmond GM (Ed.), Glaciations of the Alps, Series in Earth Sciences. University of Colorado: Boulder, CO., pp. 135–142.

Mestre, O., Gruber, C., Prieur, C., Caussinus, H., Jourdain, S., 2011. SPLIDHOM: A Method for Homogenization of Daily Temperature Observations. Journal of Applied Meteorology and Climatology 50, 2343–2358. doi:10.1175/2011JAMC2641.1

Meyer, M.C., Spötl, C., Mangini, A., 2008. The demise of the Last Interglacial recorded in isotopically dated speleothems from the Alps. Quaternary Science Reviews 27, 476–496. doi:10.1016/j.quascirev.2007.11.005

Mirtl, M., Bahn, M., Battin, T.J., Borsdorf, A., Englisch, M., Gaube, V., Grabherr, G., Gratzer, G., Haberl, H., Kreiner, D., Richter, A., Schindler, D., Tappeiner, U., Winiwarter, V., Zink, R., 2012. Next Generation LTER“ in Österreich – Zu Lage und Ausrichtung von prozessorientierter Ökosystemforschung, Biodiversitäts- und Naturschutzforschung sowie sozioökologischer Forschung in Österreich, 3rd ed.

Moberg, A., Jones, P.D., Lister, D., Walther, A., Brunet, M., Jacobeit, J., Alexander, L.V., Della-Marta, P.M., Luterbacher, J., Yiou, P., Chen, D., Klein Tank, A.M.G., Saladié, O., Sigró, J., Aguilar, E., Alexandersson, H., Almarza, C., Auer, I., Barriendos, M., Begert, M., Bergström, H., Böhm, R., Butler, C.J., Caesar, J., Drebs, A., Founda, D., Gerstengarbe, F.-W., Micela, G., Maugeri, M., Österle, H., Pandzic, K., Petrakis, M., Srnec, L., Tolasz, R., Tuomenvirta, H., Werner, P.C., Linderholm, H., Philipp, A., Wanner, H., Xoplaki, E., 2006. Indices for daily temperature and precipitation extremes in Europe analyzed for the period 1901–2000. Journal of Geophysical Research 111, D22106. doi:10.1029/2006JD007103

Monegato, G., Ravazzi, C., Donegana, M., Pini, R., Calderoni, G., Wick, L., 2007. Evidence of a two-fold glacial advance during the last glacial maximum in the Tagliamento end moraine system (eastern Alps). Quaternary Research 68, 284–302. doi:10.1016/j.yqres.2007.07.002

Müller, U.C., Kukla, G.J., 2004. North Atlantic Current and European environments during the declining stage of the last interglacial. Geology 32, 1009–1012. doi:10.1130/G20901.1

Nemec, J., Chimani, B., Gruber, C., Auer, I., 2011. Ein neuer Datensatz für die Klimaforschung – homogenisierte Tagesdaten. ÖGM Bulletin 2011/1, 19–20.

Nemec, J., Gruber, C., Chimani, B., Auer, I., 2012. Trends in extreme temperature indices in Austria based on a new homogenised dataset. Int. J. Climatol. 33, 1538–1550. doi:10.1002/joc.3532

Nicolussi, K., 2009a. Klimaentwicklung in den Alpen während der letzten 7000 Jahre, in: Oeggl, K., Prast, M. (Eds.), Die Geschichte Des Bergbaus in Tirol Und Seinen Angrenzenden Gebieten. Proceedings des 3. Milestone-Meetings des SFB HiMAT vom 23.–26.10.1008 in Silbertal. Innsbruck University Press, Innsbruck, pp. 109–124.

Nicolussi, K., 2009b. Alpine Dendrochronologie – Untersuchungen zur Kenntnis der holozänen Umwelt- und Klimaentwicklung, in: Schmidt, R., Matulla, C., Psenner, R. (Eds.), Klimawandel in Österreich: Die Letzten 20.000 Jahre – und ein Blick voraus, Alpine Space – Man & Environment. Innsbruck University Press, Innsbruck, pp. 41–54.

Nicolussi, K., 2011. Gletschergeschichte der Pasterze – Spurensuche in die nacheiszeitliche Vergangenheit., in: Lieb, G.K., Slupetzky, H. (Eds.), Die Pasterze. Der Gletscher am Großglockner. Verlag Anton Pustet, pp. 24–27.

Nicolussi, K., Schlüchter, C., 2012. The 8.2 ka event—calendar-dated glacier response in the Alps. Geology 40, 819–822. doi:10.1130/G32406.1

Nicolussi, K., Patzelt, G., 2001. Untersuchungen zur holozänen Gletscherentwicklung von Pasterze und Gepatschferner (Ostalpen). Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie 36, 1–87.

Nicolussi, K., Lumassegger, G., Patzelt, G., Pindur, P., Schießling, P., 2004. Aufbau einer holozänen Hochlagen-Jahrring-Chronologie für die zentralen Ostalpen: Möglichkeiten und erste Ergebnisse, in: Innsbrucker Geographische Gesellschaft (Ed.), Innsbrucker Jahresbericht 2001/2002, 16. pp. 114–136.

Nicolussi, K., Kaufmann, M., Patzelt, G., Van der Plicht, J., Thurner, A., 2005. Holocene tree-line variability in the Kauner Valley, Central Eastern Alps, indicated by dendrochronological analysis of living trees and subfossil logs. Vegetation History and Archaeobotany 14, 221–234. doi:10.1007/s00334-005-0013-y

Nicolussi, K., Jörin, U., Kaiser, K.F., Patzelt, G., Thurner, A., 2006. Precisely dated glacier fluctuations in the Alps over the last four millennia, in: Price, M.F. (Ed.), Global Chance in Mountain Regions. Duncow: Sapiens, pp. 59–60.

Nicolussi, K., Pindur, P., Schiessling, P., Kaufmann, M., Thurner, A., Luzian, P., 2007. Waldzerstörende Lawinenereignisse wärend der letzten 9000 Jahre im Oberen Zemmgrund, Zillertaler Alpen, Tirol, in: Luzian, R., Pindur, P. (Eds.), Prähistorische Lawinen – Nachweis und Analyse Holozäner Lawinenereignisse in den Zillertaler Alpen, Österreich, BFW-Berichte 141/Mitteilungen Der Kommission Für Quartärforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften. Wien, pp. 157–176.

Nicolussi, K., Kaufmann, M., Melvin, T.M., van der Plicht, J., Schiessling, P., Thurner, A., 2009. A 9111 year long conifer tree-ring chronology for the European Alps: a base for environmental and climatic investigations. The Holocene 19, 909–920. doi:10.1177/0959683609336565

Nigst, P.R., Viola, T.B., Haesaerts, P., Trnka, G., 2008. Willendorf II. Wissenschaftliche Mitteilungen des Niederösterreichischen Landesmuseums 19, 31–58.

Nussbaumer, S.U., Steinhilber, F., Trachsel, M., Breitenmoser, P., Beer, J., Blass, A., Grosjean, M., Hafner, A., Holzhauser, H., Wanner, H., Zumbühl, H.J., 2011. Alpine climate during the Holocene: a comparison between records of glaciers, lake sediments and solar activity. Journal of Quaternary Science 26, 703–713. doi:10.1002/jqs.1495

Oberth, U., 2010. Untersuchung der lokalen Windsysteme im Raum Feldbach unter besonderer Berücksichtigung von Kaltluftabflüssen (Diplomarbeit). Inst. für Geographie und Raumforschung, Universität Graz, Graz.

Oeggl, K., 2009. The significance of the Tyrolean Iceman for the archaeobotany of Central Europe. Vegetation History and Archaeobotany 18, 1–11. doi:10.1007/s00334-008-0186-2

Oeggl, K., Nicolussi, K., 2009. Prähistorische Besiedlung von zentralen Alpentälern in Bezug zur Klimaentwicklung, in: Schmidt, R., Matulla, C., Psenner, R. (Eds.), Klimawandel in Österreich: Die Letzten 20.000 Jahre – und ein Blick voraus, Alpine Space – Man & Environment. Innsbruck University Press, Innsbruck, pp. 77–86.

Oeggl, K., Unterfrauner, H., 2001. Die Pflanzenreste des Riss/Würm-Interglazials und des Würmglazials von Mondsee, in: van Husen, D. (Ed.), Klimaentwicklung Im Riss/Würm Interglazial (Eem) und Frühwürm (Sauerstoffisotopenstufe 6-3) in den Ostalpen., Mitt. Komm. Quartärforschung Österr. Akad. Wiss. Verlag der Österreichische Akademie der Wissenschaften, Wien, pp. 93–121.

Ohlendorf, C., 1999. High alpine lake sediments as chronicles for regional glacier and climate history in the Upper Engadine, southeastern Switzerland. ETH, Shaker Verlag Aachen.

Ohmura, A., Kasser, P., Funk, M., 1992. Climate at the equilibrium line of glaciers. Journal of Glaciology 38, 397–411.

Olefs, M., Schöner, W., Mair, M., 2011. New radiation initiatives in Austria: Part I (Monitoring according to BSRN standard. Geophysical Research Abstracts 13, 8th EGU General Assembly.

Olefs, M., Schöner, W., 2012. A new solar radiation model for research and applications in Austria. Geophysical Research Abstracts 14.

Pachatz, G.C., 2005. Analyse der Effizienz der Hagelabwehr in der Steiermark anhand von Fallbeispielen (Uni-Graz-IGAM Wissenschaftlicher Bericht No. 3-2005).

Pasztor, F.; Matulla, C.; Zuvela-Aloise, M.; Rammer, W.; Lexer, MJ., 2014. Developing predictive models of wind damage in Austrian forests. Annals of Forest Science 06/2014; DOI:10.1007/s13595-014-0386-0

Patzelt, G., 1987. Untersuchungen zur nacheiszeitlichen Schwemmkegel- und Talentwicklung in Tirol. 1. Teil: Das Inntal zwischen Mötz und Wattens. Veröffentlichungen des Tiroler Landesmuseums Ferdinandeum 67, 93–122.

Patzelt, G., Bortenschlager, S., 1973. Die postglazialen Gletscher- und Klimaschwankungen in der Venedigergruppe (Hohe Tauern, Ostalpen). Zeitschrift für Geomorphologie, Supplement 16, 25–72.

Pearson, E.J., Juggins, S., Talbot, H.M., Weckström, J., Rosén, P., Ryves, D.B., Roberts, S.J., Schmidt, R., 2011. A lacustrine GDGT-temperature calibration from the Scandinavian Arctic to Antarctic: Renewed potential for the application of GDGT-paleothermometry in lakes. Geochimica et Cosmochimica Acta 75, 6225–6238. doi:10.1016/j.gca.2011.07.042

Peña, D., Tiao, G.C., Tsay, 2001. A course in time series analysis. J. Wiley, New York.

Penck, A., Brückner, G.C., 1901. Die Alpen im Eiszeitalter. Tauchnitz, Leipzig.

Peterson, T.C., Easterling, D.R., Karl, T.R., Groisman, P., Nicholls, N., Plummer, N., Torok, S., Auer, I., Boehm, R., Gullett, D., Vincent, L., Heino, R., Tuomenvirta, H., Mestre, O., Szentimrey, T., Salinger, J., Førland, E.J., Hanssen-Bauer, I., Alexandersson, H., Jones, P., Parker, D., 1998. Homogeneity adjustments of in situ atmospheric climate data: a review. International Journal of Climatology 18, 1493–1517. doi:10.1002/(SICI)1097-0088(19981115)18:13<1493::AID-JOC329>3.0.CO;2-T

Pfister, C., 1999. Wetternachhersage: 500 Jahre Klimavariationen und Naturkatastrophen (1496–1995). Haupt, Bern.
Pfister, C., 2010. Kulturgeschichte des Klimas: Von der Eiszeit bis zur globalen Erwärmung / Cultural history of the climate: from the ice age to the global warming. English Historical Review 125, 503–504.
Pini, R., Ravazzi, C., Donegana, M., 2009. Pollen stratigraphy, vegetation and climate history of the last 215ka in the Azzano Decimo core (plain of Friuli, north-eastern Italy). Quaternary Science Reviews 28, 1268–1290. doi:10.1016/j.quascirev.2008.12.017
Prein, A.F., Truhetz, H., Suklitsch, M., Gobiet, A., 2011. NHCM-1: Non-Hydrostatic Climate Modelling Part III, Evaluation of the Local Climate Model Intercomparison Project (LocMIP) simulations (Scientific Report No. 41). Wegener Center Verlag, Graz.
Prettenthaler, F., Dalla-Via, A. (Eds.), 2007. Wasser & Wirtschaft im Klimawandel. Konkrete Ergebnisse am Beispiel der sensiblen Region Oststeiermark,, Studien zum Klimawandel in Österreich. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien.
Rasmussen, S.O., Andersen, K.K., Svensson, A.M., Steffensen, J.P., Vinther, B.M., Clausen, H.B., Siggaard-Andersen, M.-L., Johnsen, S.J., Larsen, L.B., Dahl-Jensen, D., Bigler, M., Röthlisberger, R., Fischer, H., Goto-Azuma, K., Hansson, M.E., Ruth, U., 2006. A new Greenland ice core chronology for the last glacial termination. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 111, D06102. doi:10.1029/2005JD006079
Reasoner, M.A., Tinner, W., 2009. Holocene treeline fluctuations, in: Gornitz, V. (Ed.), Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments. Springer, pp. 442–446.
Reitmaier, T., 2010. Auf der Hut–Methodische Überlegungen zur prähistorischen Alpwirtschaft in der Schweiz, in: Mandl, F., Stadler, H. (Eds.), Archäologie in den Alpen. Alltag und Kult. Haus in E. / Innsbruck, pp. 219–238.
Reitner, J., 2003a. Bericht 2000 über geologische Aufnahmen im Quartär auf Blatt 179 Lienz. Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt 143, 391–397.
Reitner, J., 2003b. Bericht 1998 / 1999 über geologische Aufnahmen im Quartär auf Blatt 179 Lienz, Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt 143, 516–524.
Reitner, J., 2005a. Quartärgeologie und Landschaftsentwicklung im Raum Kitzbühel-St. Johann i.T.- Hopfgarten (Nordtirol) vom Riss bis in das Würm-Spätglazial (MIS 6-2) (Natwiss. Diss). Universität Wien, Wien.
Reitner, J., 2005b. Landschaftsentwicklung im Quartär. Arbeitstagung der Geologischen Bundesanstalt 2005, Blatt Spittal 63–81.
Reitner, J.M., 2007. Glacial dynamics at the beginning of Termination I in the Eastern Alps and their stratigraphic implications. Quaternary International 164–165, 64–84. doi:10.1016/j.quaint.2006.12.016
Reitner, J., 2011. Das Inngletschersystem während des Würm-Glazials, in: Gruber, A. (Ed.), Arbeitstagung 2011 der Geologischen Bundesanstalt, Blatt 88 Achenkirch. Geologische Bundesanstalt, Wien, pp. 79–88.
Renner, F.B., 1982. Beiträge zur Gletschergeschichte des Gotthardgebietes und dendroklimatologische Analysen an fossilen Hölzern, Physische Geographie. Universität Zürich, Zürich.
Renssen, H., Seppä, H., Heiri, O., Roche, D.M., Goosse, H., Fichefet, T., 2009. The spatial and temporal complexity of the Holocene thermal maximum. Nature Geoscience 2, 411–414. doi:10.1038/ngeo513
Renssen, H., Seppä, H., Crosta, X., Goosse, H., Roche, D.M., 2012. Global characterization of the Holocene Thermal Maximum. Quaternary Science Reviews 48, 7–19. doi:10.1016/j.quascirev.2012.05.022
Reszler, C., Kupfersberger, H., Truhetz, H., Gobiet, A., Sukltisch, M., 2011. Gekoppelte Klima-Hydrologie Modellierung in der Steiermark, in: Blöschl, G., Merz, R., Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften in der DWA (FgHW) (Eds.), Hydrologie und Wasserwirtschaft – von der Theorie zur Praxis: Beiträge zum Tag der Hydrologie am 24. / 25. März 2011 in Wien. DWA, pp. 173–179.
Rohr, C., 2006a. Naturerfahrung zwischen Alltag und Katastrophe. Studien zur Wahrnehmung, Deutung, Bewältigung von extremen Naturereignissen im Ostalpenraum (13.–16. Jh.), Habilitationsschrift. Salzburg, Austria.
Rohr, C., 2006b. Measuring the frequency and intensity of floods of the Traun River (Upper Austria), 1441–1574. Hydrological Sciences Journal 51, 834–847.
Roller, M., 1961. Totalisatorenbeobachtungen im Sonnblickgebiet im Zeitraum 1927 bis 1959, in: Steinhauser, F., Untersteiner, N. (Eds.), 54.–57. Jahresbericht des Sonnblick-Vereines für die Jahre 1956–1959. Springer Wien. pp. 58–61.
Šafanda, J., Rajver, D., 2001. Signature of the last ice age in the present subsurface temperatures in the Czech Republic and Slovenia. Global and Planetary Change 29, 241–257. doi:10.1016/S0921-8181(01)00093-5
Sailer, R., Kerschner, H., 1999. Equilibrium line altitudes and rock glaciers in the Ferwall-Group (Western Tyrol, Austria) during the Younger Dryas cooling event. Annals of Glaciology 28, 141–145.
Sattler, S., Wind, H., Fuchs, H., Habersack, 2003. Hochwasser 2002-Datenbasis der Schadensbilanz 2002 (Teilprojekt von StartClim. 9,), Startprojekt Klimaschutz: Erste Analysen extremer Wetterereignisse und ihrer Auswirkungen in Österreich. ZENAR Zentrum für Naturgefahren und Risikomanagement, Wien.
Schär, C., Jendritzky, G., 2004. Climate change: Hot news from summer 2003. Nature 432, 559–560. doi:10.1038/432559a
Schär, C., Vidale, P.L., Lüthi, D., Frei, C., Häberli, C., Liniger, M.A., Appenzeller, C., 2004. The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. Nature 427, 332–336. doi:10.1038/nature02300
Scheifinger, H., Böhm, R., Auer, I., 2003. Räumliche Dekorrelation von Klimazeitreihen unterschiedlicher zeitlicher Auflösung und ihre Bedeutung für ihre Homogenisierbarkeit und die Repräsentativität von Ergebnissen. Terra Nostra 6, 375–379.
Schimmelpfennig, I., Schaefer, J.M., Akcar, N., Ivy-Ochs, S., Finkel, R.C., Schlüchter, C., 2012. Holocene glacier culminations in the Western Alps and their hemispheric relevance. Geology 40, 891–894. doi:10.1130/G33169.1
Schmidt, R., Wunsam, S., Brosch, U., Fott, J., Lami, A., Löffler, H., Marchetto, A., Müller, H.W., Pražáková, M., Schwaighofer, B., 1998. Late and post-glacial history of meromictic Längsee (Austria), in respect to climate change and anthropogenic impact. Aquatic Science 60, 56–88. doi:10.1007/PL00001313
Schmidt, R., Psenner, R., Müller, J., Indinger, P., Kamenik, C., 2002a. Impact of late glacial climate variations on stratification and trophic state of the meromictic lake Längsee (Austria): validation of a conceptual model by multi proxy studies. Journal of Paleolimnology 61, 49–60. doi: http://dx.doi.org/10.4081/jlimnol.2002.49

Schmidt, R., van den Bogaard, C., Merkt, J., Müller, J., 2002b. A new Lateglacial chronostratigraphic tephra marker for the southeastern Alps: The Neapolitan Yellow Tuff (NYT) in Längsee (Austria) in the context of a regional biostratigraphy and palaeoclimate. Quaternary International 88, 45–56.

Schmidt, R., Kamenik, C., Tessadri, R., Koinig, K.A., 2006. Climatic changes from 12,000 to 4,000 years ago in the Austrian Central Alps tracked by sedimentological and biological proxies of a lake sediment core. Journal of Paleolimnology 35, 491–505. doi:10.1007/s10933-005-2351-2

Schmidt, R., Drescher-Schneider, R., Huber, K., Weckström, K., 2009. Die Bedeutung des Längsees in Kärnten für die Rekonstruktion der Klima- und Seenentwicklung am Ende der letzten Eiszeit, in: Schmidt, R., Matulla, C., Psenner, R. (Eds.), Klimawandel in Österreich – Die letzten 20.000 Jahre und ein Blick voraus, Alpine Space – Man and Environment Vol. 6. Innsbruck University Press, pp. 27–40.

Schmidt, R., Weckström, K., Lauterbach, S., Tessadri, R., Huber, K., 2012. North Atlantic climate impact on early late-glacial climate oscillations in the south-eastern Alps inferred from a multi-proxy lake sediment record. Journal of Quaternary Science 27, 40–50. doi:10.1002/jqs.1505

Schoeneich, P., 1998. Le retrait glaciaire dans les vallées des Ormonts, de l'Hongrin et de l'Etivaz (Préalpes Vaudoises). Travaux et Recherches. Institut de géographie, Lausanne.

Schöner, W., Böhm, R., 2007. A statistical mass-balance model for reconstruction of LIA ice mass for glaciers in the European Alps. Annals of Glaciology 46, 161–169. doi:10.3189/172756407782871639

Schulz, W., Cummins, K., Diendorfer, G., Dorninger, M., 2005. Cloud-to-ground lightning in Austria: A 10-year study using data from a lightning location system. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 110. doi:10.1029/2004JD005332

Schwander, J., Eicher, U., Ammann, B., 2000. Oxygen isotopes of lake marl at Gerzensee and Leysin (Switzerland), covering the Younger Dryas and two minor oscillations, and their correlation to the GRIP ice core. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 159, 203–214. doi: 10.1016/S0031-0182(00)00085-7

Schweingruber, F.H., 1983. Der Jahrring: Standort, Methodik, Zeit und Klima in der Dendrochronologie. Haupt, Bern.

Sherwood, S.C., Meyer, C.L., Allen, R.J., Titchner, H.A., 2008. Robust tropospheric warming revealed by iteratively homogenized radiosonde data. Journal of Climate 21, 5336–5352. doi:10.1175/2008JCLI2320.1

Slupetzky, H., 1993. Holzfunde aus dem Vorfeld der Pasterze. Erste Ergebnisse von 14C-Datierungen. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie 26, 179–187.

Sneyers, R., 1990. On the Statistical Analysis of Series of Observations. Technical Note No. 143. (415). WMO - World Meteorological Organization. Geneva, Switzerland

Spengler, R., Claus, C., Streicher, O., 2003. Benutzerhandbuch des Datenprüf- und Monitoringsystems QualiMET.

Spötl, C., Boch, R., 2012. Uranium series dating of speleothems, in: William B. White, David C. Culver (Eds.), Encyclopedia of Caves (Second Edition). Academic Press, Amsterdam, pp. 838–844.

Spötl, C., Mangini, A., 2006. U / Th age constraints on the absence of ice in the central Inn Valley (Eastern Alps, Austria) during Marine Isotope Stages 5c to 5a. Quaternary Research 66, 167–175. doi:10.1016/j.yqres.2006.03.002

Spötl, C., Mangini, A., Richards, D.A., 2006. Chronology and palaeoenvironment of Marine Isotope Stage 3 from two high-elevation speleothems, Austrian Alps. Quaternary Science Reviews 25, 1127–1136. doi:10.1016/j.quascirev.2005.10.006

Spötl, C., Holzkämper, S., Mangini, A., 2007a. The last and the penultimate interglacial as recorded by speleothems from a climatically sensitive high-elevation cave site in the Alps, in: Developments in Quaternary Sciences. Elsevier, pp. 471–491.

Spötl, C., Offenbecher, K.-H., Boch, R., Meyer, M., Mangini, A., Kramers, J., Pavuza, R., 2007b. Tropfstein-Forschung in österreichischen Höhlen – ein Überblick. Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt 147, 117–167.

Spötl, C., Scholz, D., Mangini, A., 2008. A terrestrial U / Th-dated stable isotope record of the Penultimate Interglacial. Earth and Planetary Science Letters 276, 283–292. doi:10.1016/j.epsl.2008.09.029

Spötl, C., Nicolussi, K., Patzelt, G., Boch, R., 2010. Humid climate during deposition of sapropel 1 in the Mediterranean Sea: Assessing the influence on the Alps. Global and Planetary Change 71, 242–248. doi:10.1016/j.gloplacha.2009.10.003

Spötl, C., Reimer, P.J., Starnberger, R., Reimer, R.W., 2013. A new radiocarbon chronology of Baumkirchen, stratotype for the onset of the Upper Würmian in the Alps. J. Quaternary Sci. 28, 552–558. doi:10.1002/jqs.2645

Spurk, M., Friedrich, M., Hofmann, J., Remmele, S., Frenzel, B., Leuschner, H.H., Kromer, B., 1998. Revisions and extension of the Hohenheim oak and pine chronologies; new evidence about the timing of the Younger Dryas / Preboreal transition. Radiocarbon 40, 1107–1116.

Starnberger, R., Rodnight, H., Spötl, C., 2011. Chronology of the last glacial maximum in the Salzach Palaeoglacier area (Eastern Alps). Journal of Quaternary Science 26, 502–510. doi: 10.1002/jqs.1477

Steffensen, J.P., Andersen, K.K., Bigler, M., Clausen, H.B., Dahl-Jensen, D., Fischer, H., Goto-Azuma, K., Hansson, M., Johnsen, S.J., Jouzel, J., Masson-Delmotte, V., Popp, T., Rasmussen, S.O., Rothlisberger, R., Ruth, U., Stauffer, B., Siggaard-Andersen, M.-L., Sveinbjornsdottir, A.E., Svensson, A., White, J.W.C., 2008. High-resolution Greenland ice core data show abrupt climate change happens in few years. Science 321, 680–684. doi:10.1126/science.1157707

Steinhilber, F., Beer, J., Fröhlich, C., 2009. Total solar irradiance during the Holocene. Geophysical Research Letters 36. doi:10.1029/2009GL040142

Steinhilber, F., Abreu, J.A., Beer, J., Brunner, I., Christl, M., Fischer, H., Heikkilä, U., Kubik, P.W., Mann, M., McCracken, K.G., 2012. 9,400 years of cosmic radiation and solar activity from ice cores and tree rings. Proceedings of the National Academy of Sciences 109, 5967–5971. doi: www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1118965109

Stepanek, P., 2011. Documentation for ProClimDB Software.

Stephenson, A.G., 2009. High-dimensional parametric modelling of multivariate extreme events. Australian & New Zealand Journal of Statistics 51, 77–88. doi:10.1111/j.1467-842X.2008.00528.x

Stommel, H., Stommel, E., 1983. Volcano weather: the story of 1816, the year without a summer. Seven Seas Press, Newport, RI.

Streicher, O., 2003. Anhang zum Benutzerhandbuch des Datenprüf- und Monitoringsystems QualiMET.

Strömmer, E., 2003. Klima-Geschichte: Methoden der Rekonstruktion und historische Perspektive: Ostösterreich 1700 bis 1830. Franz Deuticke, Wien.

Studer, M., 2005. Gletschergeschichtliche Untersuchungen und geomorphologische Kartierung im Raum Maloja-Val Forno: Ein Beitrag zur regionalen Landschaftsgeschichte (Diplomarbeit). Geographisches Institut der Universität Zürich, Zürich.

Svabik, O., 1989. Review of meteorological aspects on hail defense activities in Austria. Theoretical and Applied Climatology 40, 247–254. doi:10.1007/BF00865975

Swierczynski, T., Brauer, A., Lauterbach, S., Martin-Puertas, C., Dulski, P., von Grafenstein, U., Rohr, C., 2012. A 1600 yr seasonally resolved record of decadal-scale flood variability from the Austrian Pre-Alps. Geology 40, 1047–1050. doi:10.1130/G33493.1

Terhorst, B., Thiel, C., Peticzka, R., Sprafke, T., Frechen, M., Fladerer, A., Roetzel, R., Neugebauer-Maresch, C., 2011. Casting new light on the chronology of the loess / paleosol sequences in Lower Austria. E & G Quaternary Science Journal 60, 270–277. doi:10.3285/eg.60.2-3

Thiel, C., Buylaert, J.-P., Murray, A.S., Terhorst, B., Tsukamoto, S., Frechen, M., Sprafke, T., 2011a. Investigating the chronostratigraphy of prominent palaeosols in Lower Austria using post-IR IRSL dating. E & G Quaternary Science Journal 60, 137–152. doi:10.3285/eg.60.1

Thiel, C., Terhorst, B., Jaburová, I., Buylaert, J.-P., Murray, A.S., Fladerer, F.A., Damm, B., Frechen, M., Ottner, F., 2011b. Sedimentation and erosion processes in Middle to Late Pleistocene sequences exposed in the brickyard of Langenlois / Lower Austria. Geomorphology 135, 295–307. doi:10.1016/j.geomorph.2011.02.011

Titchner, H.A., Thorne, P.W., McCarthy, M.P., Tett, S.F.B., Haimberger, L., Parker, D.E., 2009. Critically reassessing tropospheric temperature trends from radiosondes using realistic validation experiments. Journal of Climate 22, 465–485. doi:10.1175/2008JCLI2419.1

Trachsel, M., Kamenik, C., Grosjean, M., McCarroll, D., Moberg, A., Brázdil, R., Büntgen, U., Dobrovolný, P., Esper, J., Frank, D.C., Friedrich, M., Glaser, R., Larocque-Tobler, I., Nicolussi, K., Riemann, D., 2012. Multi-archive summer temperature reconstruction for the European Alps, AD 1053–1996. Quaternary Science Reviews 46, 66–79. doi:10.1016/j.quascirev.2012.04.021

Trouet, V., Esper, J., Graham, N.E., Baker, A., Scourse, J.D., Frank, D.C., 2009. Persistent positive North Atlantic Oscillation mode dominated the Medieval Climate Anomaly. Science 324, 78–80. doi:10.1126/science.1166349

Tzedakis, P.C., Channell, J.E.T., Hodell, D.A., Kleiven, H.F., Skinner, L.C., 2012. Determining the natural length of the current interglacial. Nature Geoscience 5, 138–141. doi:10.1038/ngeo1358

Van Husen, D., 1977. Zur Fazies und Stratigraphie der jungpleistozänen Ablagerungen im Trauntal. Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt 120, 1-130.

Van Husen, D., 1987. Die Ostalpen und ihr Vorland in der letzten Eiszeit. Geologische Bundesanstalt, Wien.

Van Husen, D., 2000. Geological processes during the Quaternary. Mitteilungen der Österreichischen Geologischen Gesellschaft 92, 135–156.

Van Husen, D., 2004. Quaternary glaciations in Austria. Developments in Quaternary Sciences 2, 1–13. doi:10.1016/S1571-0866(04)80051-4

Van Husen, D., Reitner, J.M., 2011. Die Löss-Sequenz Wels / Aschet (ehemalige Lehmgrube Würzburger). Ein Referenzprofil für das Mittel- und Jungpleistozän im nördlichen Alpenvorland (MIS 16 bis MIS 2). Mitteilungen der Kommission für Quartärforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften 19, 1-70.

Venema, V.K.C., Mestre, O., Aguilar, E., Auer, I., Guijarro, J.A., Domonkos, P., Vertacnik, G., Szentimrey, T., Stepanek, P., Zahradnicek, P., Viarre, J., Müller-Westermeier, G., Lakatos, M., Williams, C.N., Menne, M., Lindau, R., Rasol, D., Rustemeier, E., Kolokythas, K., Marinova, T., Andresen, L., Acquaotta, F., Fratianni, S., Cheval, S., Klancar, M., Brunetti, M., Gruber, C., Prohom Duran, M., Likso, T., Esteban, P., Brandsma, T., 2012. Benchmarking monthly homogenization algorithms. Climate of the Past 8, 89-112. doi:10.5194/cp-8-89-2012

Vinther, B.M., Buchardt, S.L., Clausen, H.B., Dahl-Jensen, D., Johnsen, S.J., Fisher, D.A., Koerner, R.M., Raynaud, D., Lipenkov, V., Andersen, K.K., Blunier, T., Rasmussen, S.O., Steffensen, J.P., Svensson, A.M., 2009. Holocene thinning of the Greenland ice sheet. Nature 461, 385–388. doi:10.1038/nature08355

Vollweiler, N., Scholz, D., Mühlinghaus, C., Mangini, A., Spötl, C., 2006. A precisely dated climate record for the last 9 kyr from three high alpine stalagmites, Spannagel Cave, Austria. Geophysical Research Letters 33, L20703. doi:10.1029/2006GL027662

Von Grafenstein, U., Erlenkeuser, Brauer, Jouzel, Johnsen, 1999. A mid-European decadal isotope-climate record from 15,500 to 5000 years B.P. Science 284, 1654–1657. doi:10.1126/science.284.5420.1654

Wakonigg, H., 1978. Witterung und Klima in der Steiermark. Verlag für die Technische Universität, Graz.

Wakonigg, H., Podesser, A., 2010. Klimaregionen der Steiermark, in: Prettenthaler, F., Podesser, A., Pilger, H. (Eds.), Klimaatlas Steiermark: Periode 1971-2000: Eine anwenderorientierte Klimatographie, Studien zum Klimawandel in Österreich. Verlag der österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien.

Walker, M., Johnsen, S., Rasmussen, S.O., Popp, T., Steffensen, J.-P., Gibbard, P., Hoek, W., Lowe, J., Andrews, J., Björck, S., 2009. Formal definition and dating of the GSSP (Global Stratotype Section and Point) for the base of the Holocene using the Greenland NGRIP ice core, and selected auxiliary records. Journal of Quaternary Science 24, 3–17. doi: 10.1002/jqs.1227

Wallner, A., 2008. Räumlich hochaufgelöste Klimatologien von Starkregenereignissen in der Oststeiermark einschließlich der Fokusregion WegenerNet (Wissenschaftlicher Bericht No. 24). Wegener Center, Graz, Austria.

Wanner, H., 2007. Der Klimawandel in historischer Zeit, in: Endlicher, W., Gerstengarbe, F.-W. (Eds.), Der Klimawandel – Einblikke, Rückblicke und Ausblicke (Klimawandel). Institut für Klimafolgenforschung und Humboldt-Universität zu Berlin, Potsdam, pp. 27–34.

Wanner, H., Beer, J., Bütikofer, J., Crowley, T.J., Cubasch, U., Flükkiger, J., Goosse, H., Grosjean, M., Joos, F., Kaplan, J.O., Küttel, M., Müller, S.A., Prentice, I.C., Solomina, O., Stocker, T.F., Tarasov, P., Wagner, M., Widmann, M., 2008. Mid- to Late Holocene climate change: an overview. Quaternary Science Reviews 27, 1791–1828. doi:10.1016/j.quascirev.2008.06.013

Welten, M., 1982. Vegetationsgeschichtliche Untersuchungen in den westlichen Schweizer Alpen: Bern-Wallis (Textheft + Diagrammheft) (PANGAEA Documentation No. 95), Denkschriften der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft. Brikhäuser Verlag, Basel - Boston - Stuttgart.

Wilhelm, B., Arnaud, F., Sabatier, P., Crouzet, C., Brisset, E., Chaumillon, E., Disnar, J.-R., Guiter, F., Malet, E., Reyss, J.-L., 2012. 1400 years of extreme precipitation patterns over the Mediterranean French Alps and possible forcing mechanisms. Quaternary Research 78, 1–12. doi:10.1016/j.yqres.2012.03.003

Wilks, D.S., 2006. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. Academic Press.

Wolff, E.W., Chappellaz, J., Blunier, T., Rasmussen, S.O., Svensson, A., 2010. Millennial-scale variability during the last glacial: The ice core record. Quaternary Science Reviews 29, 2828–2838. doi:10.1016/j.quascirev.2009.10.013
Wunsam, S., Schmidt, R., Klee, R., 1995. Cyclotella-taxa (Bacillariophyceae) in lakes of the Alpine region and their relationship to environmental variables. Aquatic Sciences 57, 360–386.
Wurth, G., Niggemann, S., Richter, D.K., Mangini, A., 2004. The Younger Dryas and Holocene climate record of a stalagmite from Hölloch Cave (Bavarian Alps, Germany. Journal of Quaternary Science 19, 291–298. doi:10.1002/jqs.837
Zimmermann, K., 2009. Zeitreise durch die Technik in der Meteorologie. ÖGM Bulletin, ZAMG 2009/2.
Zrost, D., Nicolussi, K., Thurner, A., 2007. Holozäne Lawinenereignisse im Jahrringbild der subfossilen Hölzer des Schwarzensteinmoores, Zillertaler Alpen, in: Luzian, D., Pindur, P. (Eds.), Prähistorische Lawinen – Nachweis und Analyse holozäner Lawinenereignisse in den Zillertaler Alpen, Österreich. Mitteilungen der Kommission für Quartärforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften 16, 177–189.

3.5 Anhang
3.5 Annex

Tabelle 3.A1 Übersicht über die online Verfügbarkeit von Daten aus dem Messnetz der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik
Table 3.A1 Online data available from monitoring networks of Central Institute for Meteorology and Geodynamics, Vienna, Austria

Parameter	Zeitraum	Weitere Informationen	Internet
Temperatur			
	ab 1760	HISTALP: Homogenisierte monatl. Temperaturzeitreihen [°C]	HISTALP
	ab 1767	Monatsmittel $(7+19+M_{MAX}+M_{MIN})/4$ ab 1971, (7+14+21+21)/4 vor 1971 [1/10°C]	Jahrbuch ab 1994
	ab 1775	T-Beobachtungen 7/14/19–21 MOZ, vor 1971 21 Uhr [1/10°C]	Jahrbuch ab 1994 (Stationsauswahl)
	ab 1775	Monatsmittel zum 7/14/19–21 Uhr Termin [1/10°C]	Jahrbuch ab 1994
	ab 1855	Tagesmittel [1/10°C]	Jahrbuch ab 1994 (Stationsauswahl)
	ab 1855	Anzahl der Tage im Jahr mit Tagesmittel in best. T-Bereich	Jahrbuch ab 1994
	ab 1941	Stündliche Beobachtungen [1/10°C]	
Min-Max-Temperatur			
	ab 1808	Absolute monatl. Maxima/Minima [1/10°C]	Jahrbuch ab 1994
	ab 1851	Mittlere tägl. Maxima/Minima [1/10°C]	Jahrbuch ab 1994
	ab 1855	Tägliche Beobachtungen [1/10°C]	Jahrbuch ab 1994 (Stationsauswahl)
	ab 1855	Absolutes monatl. Maximum/Minimum – Tag d. Registrierung	Jahrbuch ab 1994
	ab 1948 (bis 2009)	HOM-START: Homogenisierte tägliche T_{max}-Zeitreihen (57 Stationen)	HOM-START
	ab 1948 (bis 2009)	HOM-START: Homogenisierte tägliche T_{min}-Zeitreihen (55 Stationen)	HOM-START
Niederschlag			
	ab 1800	HISTALP: Homogenisierte monatliche Niederschlagszeitreihen [mm]	HISTALP
	ab 1820	Monatssumme [mm]	Jahrbuch ab 1994
	ab 1820	Größter Tagesniederschlag des Monats in mm	Jahrbuch ab 1994
	ab 1821	Anzahl Tage im Monat mit Niederschlag mindestens 01 mm	Jahrbuch ab 1994
	ab 1852	Tagessumme 7 Uhr bis 7 Uhr morgen	Jahrbuch ab 1994 (Stationsauswahl)
	ab 1852	tägl. Niederschlagsart (Code 0–15)	Jahrbuch ab 1994 (Stationsauswahl)
	ab 1852	Anzahl der Tage mit Niederschlagsmenge in best. Bereich	Jahrbuch ab 1994
	ab 1852	Anzahl Tage mit Niederschlagssumme ≥ 15/20/30 mm	
	ab 1852	Anzahl Tage im Monat mit Niederschlag mindestens 1/10 mm	Jahrbuch ab 1994
	ab 1852	max. Niederschlagssumme – Tag d. Registrierung	Jahrbuch ab 1994

Parameter	Zeitraum	Weitere Informationen	Internet
	ab 1941	stündliche Beobachtungen [1/10 mm]	
	ab 1948 (bis 2009)	HOM-START: Homogenisierte tägliche Niederschlagszeitreihen (57 Stationen)	HOM-START
	ab 1981	minütliche Beobachtungen	
	ab 1983 (bis 1997)	stündliche Beobachtungen [1/100 mm] – nur GRO (5969)	
Luftdruck			
	ab 1760	HISTALP: Homogenisierte monatliche Luftdruckzeitreihen [hPa]	HISTALP
	ab 1815	p-Beobachtungen 07/14/19-21 MOZ [1/10 hPa]	Jahrbuch ab 1994 (Stationsauswahl)
	ab 1815	Tagesmittel [1/10 hPa]	
	ab 1850	Monatsmittel [1/10 hPa]	Jahrbuch ab 1994
	ab 1961	stündliche Beobachtungen [1/10 hPa]	
Luftfeuchte			
	ab 1850	Monatsmittel (7+7+14+19)/4	Jahrbuch ab 1994
	ab 1852	rel. Feuchte-Beobachtungen 7/14/19–21 Uhr MOZ [%]	Jahrbuch ab 1994 (Stationsauswahl)
	ab 1852	Tagesmittel [%]	
	ab 1852	Monatsmittel zum 7/14/19–21 Uhr Termin	Jahrbuch ab 1994
	ab 1948	Stündliche Beobachtungen [%]	
Schneehöhe			
	ab 1893	Gesamtschneehöhe 7 Uhr MOZ [cm]	Jahrbuch ab 1994 (Stationsauswahl)
	ab 1894	Zahl der Tage im Monat mit Schneehöhen ≥1/5/15/20/30/50/100cm	Jahrbuch ab 1994
	ab 1894	Maximale Tagesschneehöhe des Monats [cm]	Jahrbuch ab 1994
	ab 1894	Anzahl Tage im Monat Schneedecke (Schneehöhe ≥ 1cm)	Jahrbuch ab 1994
	ab 1984	stündliche Beobachtungen [cm]	
Neuschnee			
	ab 1893	Tagessumme [cm]	Jahrbuch ab 1994 (Stationsauswahl)
	ab 1895	Höchste Tagesneuschneemenge [cm]	
	ab 1895	Monatssumme [cm]	
Wind			
	ab 1852	Windstärke-Beobachtungen 7/14/19–21 Uhr MOZ [Bft.]	Jahrbuch ab 1994 (Stationsauswahl)
	ab 1852	Windstärke Tagesmittel [1/10 m/s]	
	ab 1852	Windgeschwindigkeit Monatsmittel [1/10 m/s]	Jahrbuch ab 1994
	ab 1852	Windrichtung-Beobachtungen 07/14/19–21 Uhr MOZ 32-teilig	Jahrbuch ab 1994 (Stationsauswahl)
	ab 1853	Windrichtung Anzahl der Termine/Monat mit Windrichtung N/NO/O/S O/S/SW/W/NW	Jahrbuch ab 1994
	ab 1853	Anzahl Tage im Monat mit Calmen	Jahrbuch ab 1994
	ab 1915	Windstärke Tagesmaximum [1/10 m/s]	
	ab 1950 (bis 1995)	stündliche Beobachtungen Windrichtung 32-teilig	
	ab 1950	stündliche Beobachtungen Windgeschwindigkeit [1/10 m/s]	
	ab 1956	stündliche Beobachtungen Windrichtung 360 Grad [°]	
	ab 1983 (bis 2004)	stündliche Beobachtungen Windgeschwindigkeit 10 m [1/10 m/s] – nur GRO (5972)	
Bewölkung			
	ab 1808	Monatsmittel (7+14+19)/3	Jahrbuch ab 1994
	ab 1852	Beobachtungen um 07/14/19–21 Uhr MOZ [1/10]	Jahrbuch ab 1994 (Stationsauswahl)
	ab 1852	Tagesmittel [1/100]	Jahrbuch ab 1994 (Stationsauswahl)
	ab 1961	Beobachtungen [1/8] um 07/10/13/16/19 Uhr	

Parameter	Zeitraum	Weitere Informationen	Internet
	ab 1970	Beobachtungen [1/8] um 01/04/07/10/13/16/19/22 Uhr	
	ab 1973 (bis 2008)	stündliche Beobachtungen [1/8] (ab 1986 nur mehr Station 5000/5001)	
	ab 1988 (bis 1992)	Beobachtungen [1/10] um 07/14/21 Uhr	
Globalstrahlung			
	ab 1951	stündliche Beobachtungen [J/cm²]	
	ab 1951	Monatssumme [J/cm²]	Jahrbuch ab 1994 (Stationsauswahl)
	ab 1952	Tagessumme [J/cm²]	Jahrbuch ab 1994 (Stationsauswahl)
	ab 2006	stündliche Beobachtungen [W/m²]	
Dampfdruck			
	ab 1850	Monatsmittel Dampfdruck (7+14+19)/3 [1/10 hPa], berechnet aus 2 m Lufttemperatur und relative Feuchtigkeit	Jahrbuch ab 1994
	ab 1852	Dampfdruck [1/10 hPa] Tagesmittel	Jahrbuch ab 1994 (Stationsauswahl)
	ab 1951	Dampfdruck stündlich [1/10 hPa]	
Andere Feuchtemaße			
	ab 1775	Monatsmittel der abs. Feuchte [1/10 g/m³ Luft]	
	ab 1775	Tagesmaximum der abs. Feuchte [1/10 g/m³ Luft]	
	ab 1852	Monatsmittel Taupunkt [1/10 °C]	
	ab 1852	Monatsmittel des Mischungsverhältnisses [1/10 g/kg Luft]	
	ab 1882	Tagesmittel Feuchttemperatur	
Sonnenscheindauer			
	ab 1880	Tagessonnenscheindauer [1/10 Std]	
	ab 1881	Homogenisierte mittl. Sonnenscheindauer (Monatsmittel) [Std]	HISTALP
Besondere Wettererscheinungen			
	ab 1784	Anzahl Tage im Monat mit starkem Wind (≥ 6 Bft)	Jahrbuch ab 1994
	ab 1784	Anzahl Tage im Monat mit starkem Wind (≥ 8 Bft)	Jahrbuch ab 1994
	ab 1850	Anzahl Tage Gewitter im Monat	Jahrbuch ab 1994
	ab 1852	Anzahl Tage Nebel im Monat	Jahrbuch ab 1994
	ab 1852	Anzahl heiterer Tage (mittl. Bewölkung < 20/100) im Monat	Jahrbuch ab 1994
	ab 1852	Anzahl trüber Tage (mittl. Bewölkung > 80/100) im Monat	Jahrbuch ab 1994
	ab 1852	Anzahl Tage mit Tau	Jahrbuch ab 1994
	ab 1852	Anzahl Tage mit Reif	Jahrbuch ab 1994
	ab 1852	Anzahl Tage mit Raureif	Jahrbuch ab 1994
	ab 1855	Anzahl Frosttage (T_{min} < 0,0 °C) im Monat	Jahrbuch ab 1994
	ab 1855	Anzahl Eistage (T_{max} < 0,0 °C) im Monat	Jahrbuch ab 1994
	ab 1855	Anzahl Sommertage (T_{max} ≥ 25,0 °C) im Monat	Jahrbuch ab 1994
	ab 1855	Anzahl Tropentage (T_{max} ≥ 30,0 °C) im Monat	Jahrbuch ab 1994
	ab 1863	Anzahl Tage mit Graupel	Jahrbuch ab 1994
	ab 1863	Anzahl Tage mit Hagel	Jahrbuch ab 1994
	ab 1863	Anzahl Tage Schneefall im Monat	Jahrbuch ab 1994
	ab 1863	Anzahl Tage mit Schneefall und Regen	Jahrbuch ab 1994

Tabelle 3.A2 Messnetz der Hydrograhie in Österreich
Table 3.A2 Austrian hydrographic monitoring networks

Parameter	Zeitraum	Weitere Informationen	Internet
Niederschlag – Schnee – Lufttemperatur			
Niederschlag	ab 1971	Tagessumme	Tagessumme
Niederschlag	ab 1881	Monatssumme	-
Niederschlag	ab 1901	Größte Niederschlagstagessumme pro Jahr	-
Niederschlag	ab 1951	Anzahl der Tage pro Jahr in Niederschlagshöhenklassen	-
NPerioden	ab 1971	Anzahl von Niederschlagsperioden in Dauerklassen pro Jahr/Vegetationsperiode	-
Trockenperioden	ab 1951	Anzahl von Trockenperioden in Dauerklassen pro Jahr/Vegetationsperiode	-
Neuschnee	ab 1971	Tagessumme	Tagessumme
Neuschnee	ab 1901	Jahressumme*	-
Schneefall	ab 1901	Anzahl der Tage mit Neuschnee pro Jahr*	-
Schneehöhe	ab 1971	Tageswert	Tagessumme
Schneehöhe	ab 1901	Größte Schneehöhe pro Jahr*	-
Schneehöhe	ab 1951	Anzahl der Tage pro Jahr* mit Schneehöhen in bestimmten Schneehöhenklassen	-
Schneedecke	ab 1901	Erster und letzter Tag mit Schneehöhe pro Jahr*	-
Winterdecke	ab 1901	Beginn und Ende des längsten Zeitraumes mit geschlossener Schneedecke pro Jahr*	-
Schneewasserwert	ab 1998	Momentanwert	-
Schneedichte	ab 1998	Momentanwert	-
Lufttemperatur	ab 1998	Terminwerte	-
Lufttemperatur	ab 1998	Tagesmittel	-
Lufttemperatur	ab 1901	Monatsmittel	-
Lufttemperatur	ab 1901	Größtes Tagesmittel pro Jahr	-
Lufttemperatur	ab 1901	Kleinstes Tagesmittel pro Jahr	-
Lufttemperatur	ab 1951	Anzahl der Tage pro Jahr mit Tagesmittel in bestimmten Temperaturklassen	-
*Der Beobachtungszeitraum für ein Jahr reicht von 1. September des Vorjahres bis zum 31. August des Jahres.			
Oberflächengewässer			
Wasserstand	ab 1976	In Abhängigkeit vom Zeitreihenarchiv in jedem beliebigen Interpolationsintervall (15 min bis Tagesmittelwerte)	Tagesmittel bei Seepegel
Abflüsse (Tagesmittel)	ab 1951	Tagesmittelwerte	Tagesmittel
Abflüsse (kontinuierlich)	ab 1976	In jedem beliebigen Interpolationsintervall (15 min bis Tagesmittelwerte)	-
Wassertemperatur	ab 1976	Kontinuierlich, Tagesmittelwerte	Monatsmittel
Grundwasser			
Grundwasserabstich	ab 1966	wöchentliche od. zweimal wöchentliche Messungen	-
Grundwasserstand (kontinuierlich)	ab 1966	wöchentliche od. zweimal wöchentliche Messungen	-
Grundwasserstand (Monatsmittel)	ab 1930		Monatsmittel, Jahresminima, Jahresmaxima
Grundwassertemperatur	ab 1966	wöchentliche od. zweimal wöchentliche Messungen	Monatsmittel
Grundwassertemperaturprofil	ab 1985	monatliche Messungen	-
Quellwasserstand	ab 1995		-
Quellschüttung	ab 1995	Kontinuierlich	Tagesmittel

Parameter	Zeitraum	Weitere Informationen	Internet
Quellwassertempe-ratur	ab 1995	Kontinuierlich	Tagesmittel
Quellwasserleitfä-higkeit	ab 1995	Kontinuierlich	Tagesmittel
Quellwassertrübung	ab 1995		-

Band 1 Kapitel 4: Zukünftige Klimaentwicklung
Volume 1 Chapter 4: Future Climate Developments

Koordinierende LeitautorInnen
Bodo Ahrens, Herbert Formayer

LeitautorInnen
Andreas Gobiet, Georg Heinrich, Michael Hofstätter, Christoph Matulla, Andreas F. Prein, Heimo Truhetz

Beiträge von
Ivonne Anders, Klaus Haslinger, Imran Nadeem, Martin Suklitsch, Matthias Themeßl

Für den Begutachtungsprozess
Matthias Rotach

Inhalt

ZUSAMMENFASSUNG

Dieses Kapitel fasst den Erkenntnisstand der Forschung zur zukünftigen langfristigen Klimaentwicklung in Österreich, eingebettet in jene Europas, zusammen. Hier werden also wissenschaftliche Arbeiten zu Klimaprojektionen mit globalen und regionalen Klimamodellen aufgelistet und besprochen. Nicht diskutiert werden kurzfristige Klimaschwankungen verursacht durch natürliche Variabilität im Klimasystem (z. B. der atlantischen Multidekadischen Oszillation oder der ozeanisch-atmosphärischen El Niño / Southern Oscillation) und entsprechende Vorhersagen. Diese natürliche Variabilität verdeckt in Europa einen regionalen, langfristigen anthropogen verursachten Temperaturtrend bis ins dritte Jahrzehnt und einen langfristigen Niederschlagstrend bis in die zweite Hälfte des 21. Jahrhunderts. Besprochen wird der Kenntnisstand bezüglich der möglichen Klimaentwicklung unter Einfluss von anthropogenem Antrieb, wie der menschliche Einfluss auf die klimarelevanten Parameter Treibhausgaskonzentrationen, Aerosolkonzentrationen oder Landbedeckung, und natürlichem Klimaantrieb, wie die Veränderung der solaren Einstrahlung am Oberrand der Atmosphäre. Im Folgenden wird entsprechend zunächst die Darstellung der Klimaentwicklung Europas in Klimaprojektionen mit globalen Modellen besprochen, dann werden die verschiedenen Methoden der räumlichen Verfeinerung von Klimaprojektionen mit regionalen Klimamodellen eingeführt und schließlich die mögliche Entwicklung des Klimas in Österreich in Projektionen mit regionalen Modellen für das 21. Jahrhundert besprochen. Zuletzt wird exemplarisch dargestellt, wie die Information der Klimaprojektionen in der Folgeforschung genutzt werden kann.

SUMMARY

This chapter summarizes and assesses the state of scientific knowledge on future long-term climate change in Austria and Europe. This chapter discusses various climate projection studies that use global and regional climate models. This chapter will not discuss the short-term climate variations caused by the natural variability within the climate system and its corresponding predictions (e. g. Atlantic multi-decadal oscillation or ocean-atmosphere El Niño / Southern oscillation) Nevertheless, this natural climate variability conceals the anthropogenically-caused, regional, long-term temperature trend up until 2030 and the long-term precipitation trend until the second half of the 21st century. The chapter further discusses the influence of human-activity on relevant climate-affecting parameters such as land-use and land-cover, greenhouse gas and aerosol concentrations, as well as natural climate forcing agents, such as the change in solar irradiation in the upper atmosphere. Accordingly, this chapter describes the evolution of European climate with respect to global climate model projections and several methods for increasing the spatial resolution of climate projections using regional models are introduced. The possible evolution of Austrian climate will be discussed using regional climate projections for the 21st century. Finally, a few case-study examples are used to display how information drawn from climate projections can be used in climate impact research.

KERNAUSSAGEN

- Ein weiterer Temperaturanstieg in Österreich ist zu erwarten (sehr wahrscheinlich). Dieser wird in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts wegen der Trägheit des Klimasystems, der Langlebigkeit von Treibhausgasen in der Atmosphäre sowie der Trägheit der sozio-technischen Systeme nur wenig beeinflusst vom Emissionsszenario und beträgt etwa 1.4 °C. Die Temperaturentwicklung danach wird durch die vom Menschen in den kommenden Jahren verursachten Treibhausgasemissionen sehr stark bestimmt und ist daher wesentlich beeinflussbar (sehr wahrscheinlich).
- Im 21. Jahrhundert ist eine Zunahme der Niederschläge im Winterhalbjahr und eine Abnahme im Sommerhalbjahr zu erwarten (wahrscheinlich). Im Jahresdurchschnitt zeichnet sich kein deutlicher Trend ab, da der Alpenraum im Übergangsbereich zwischen zwei Zonen entgegengesetzter Trends liegt (wahrscheinlich).
- Klimamodelle lassen für die Zukunft mehr Extremereignisse erwarten. Im 21. Jahrhundert werden Temperaturextreme, z. B. die Anzahl der heißen Tage, deutlich mehr werden (sehr wahrscheinlich). Von Herbst bis Frühling werden starke und extreme Niederschläge wahrscheinlich zunehmen. Aussagen zu bisherigen Änderungen der Häufigkeit schadensverursachender Extremereignisse sind wegen unzureichender Datenlage mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Aussagen der Klimaszenarien hinsichtlich Intensität und Häufigkeit der Ereignisse in der Zukunft sind umso belastbarer je größer die räumlich / zeitliche Ausdehnung eines Extremereignisses (z. B. großräumige Trockenperioden) ist.
- Bei der Sonnenscheindauer zeigen die Klimamodelle keinen signifikanten Trend. Eine unterschiedliche saisonale Entwicklung analog zum Niederschlag ist wahrscheinlich.
- Vor allem für Aussagen über zukünftige Niederschlagsextreme im Bereich des klimatisch komplexen Alpenraums bleibt ein erheblicher Forschungsbedarf bestehen.

- Für die regionale Klimamodellierung ist ein Verschmelzen von dynamischen und statistischen Methoden sinnvoll. Stärken der unterschiedlichen Ansätze werden kombiniert, um deren individuelle Schwächen zu kompensieren.
- Die regionale Klimamodellierung ist in Österreich sehr aktiv. Hier geht es speziell um eine bessere Abbildung jener Prozesse, die im Alpenraum relevant sind. Langfristig muss neben einer weiteren Verfeinerung der räumlichen Auflösung auch an die Integrierung weiterer Prozesse (insbesondere an der Landoberfläche) gearbeitet werden.

4.1 Globale Klimaprojektionen mit Bezug zu Europa
4.1 Global climate projections with respect to Europe

In Band 1, Kapitel 1 wurden bereits die globalen Klimamodelle diskutiert, mit deren Hilfe globale Klimaprojektionen durchgeführt werden. In diesem Abschnitt wird ein Überblick über die Ergebnisse globaler Klimamodelle in Europa gegeben. Da die räumliche Auflösung globaler Modelle relativ grob ist (die interpretierbaren räumlichen Skalen sind gröber als einige 100 Kilometer; Good und Lowe, 2006), wird in diesem Abschnitt nicht detailliert auf Österreich oder den Alpenraum eingegangen. Die projizierte Klimaentwicklung Europas ist ein guter Indikator der Klimaentwicklung im Alpenraum, aber eine detailliertere regionale Analyse ist notwendig. Beispielsweise ist der von globalen Klimamodellen angezeigte Temperaturanstieg im Alpenraum um etwa 15 % größer als in einer Region, die ganz Europa (inklusive Teilen der begrenzenden Ozeane) überdeckt (Prein et al., 2011). Die detailliertere regionale Analyse mit regionalen Klimaprojektionen folgt in Band 1, Kapitel 4.

Die meisten der folgenden Ergebnisse beruhen auf einem Multi-Modell-Ensemble von 23 Klimaprojektionen mit globalen Klimamodellen, dem sogenannten CMIP3-Ensemble (Meehl et al., 2007) unter Verwendung der SRES Treibhausgasemissionsszenarien (siehe Band 1, Kapitel 1), welches auch die Grundlage für den 4. Sachstandsbericht (AR4) des Weltklimarates IPCC darstellt (Christensen et al., 2007). Diese Simulationen wurden in den letzten Jahren ausführlich analysiert und an dieser Stelle werden die Ergebnisse mit Europabezug zusammengefasst. Mittlerweile wurde die nächste Ensemblegeneration CMIP5 (Taylor et al., 2012) globaler Klimasimulationen unter Verwendung neuer Szenarien des anthropogenen Klimaantriebs, der sog. RCP Szenarien (siehe Band 1, Kapitel 1) veröffentlicht. Bisher wurden wenige detaillierte Analysen dieser globalen Simulationen für Europa veröffentlicht, allerdings haben Knutti und Sedláček (2013) gezeigt, dass die zeitlichen und räumlichen Temperatur- und Niederschlagsänderungen in CMIP3 und CMIP5 sehr ähnlich sind, wenn ähnliche Treibhausgasemissionsszenarien zugrunde gelegt sind (siehe Band 1, Kapitel 1; nach Rogelj et al. (2012) ist z. B. das in CMIP3 verwendete Szenario B1 (wahrscheinliche globale Erwärmung zwischen 1,1 und 2,9 °C im Zeitraum 2090 bis 2099 im Vergleich mit dem Zeitraum 1980 bis 1999; IPCC (2007)) mit dem neueren Szenario RCP4.5 (wahrscheinliche globale Erwärmung zwischen 1,1 und 2,6 °C im Zeitraum 2081 bis 2100 im Vergleich mit dem Zeitraum 1986 bis 2005; IPCC (2013): Summary for Policymakers) vergleichbar, wenn auch ein etwas beschleunigter globaler Temperaturanstieg in der ersten Hälfte und ein etwas reduzierter Anstieg in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts zu erwarten sind). Zukünftige Studien, die die CMIP5-Ergebnisse für Europa auswerten, lassen daher keine großen Überraschungen erwarten. Auch sind die regionalen Unsicherheiten der CMIP5-Simulationen in der Literatur auf der regionalen Skala noch nicht so eingehend diskutiert wie die der CMIP3-Simulationen. Beispielsweise simulieren die CMIP5-Modelle im Mittel einen stärkeren nordatlantischen Strahlstrom als die CMIP3-Modelle und als die Beobachtung zeigt (Cattiaux et al., 2013). Dies führt in den CMIP5-Simulationen zu einer Unterschätzung der Wintertemperaturen in Nordeuropa. Welche Auswirkungen dies auf getestete regionale Klimamodelle und Downscaling (siehe folgende Abschnitte) haben kann, ist bisher unklar. Eine erste kritische Betrachtung der Konsistenz der CMIP3 / SRES- und der CMIP5 / RCP-Simulationen ist in IPCC (2013), Working Group 1, Kapitel 12.4.9, zu finden.

Die CMIP3-Projektionen zeigen starke Unterschiede in den Klimaänderungssignalen für Nord- und Südeuropa (z. B. Christensen et al., 2007 und Giorgi und Coppola, 2007) durch den unterschiedlichen Einfluss der in Europa relevanten Klimaphänomene, wie nordatlantische Oszillation (NAO), außertropische Sturmzugbahnen und blockierende Wetterlagen. Deshalb werden diese zwei Gebiete häufig getrennt analysiert. Der Alpenraum liegt hierbei in der Übergangszone und wird daher von Prozessen, die in Nord- als auch in Südeuropa dominieren, beeinflusst.

4.1.1 Temperatur

In Abbildung 4.1 sind die CMIP3-Projektionen der Lufttemperatur über Europa (inklusive angrenzender Randmeere) dargestellt. Alle Modelle zeigen einen Temperaturanstieg. Bis

zur Mitte des Jahrhunderts resultieren die Emissionsszenarien B1, A1B und A2 in ähnlichen Temperaturzunahmen, welche zwischen 0,5 K bis 2,1 K betragen (je nach betrachtetem CMIP3 Ensemblemitglied und im Zeitraum 2031 bis 2050 im Vergleich zum Zeitraum 1971 bis 2000). Gegen Ende des Jahrhunderts (2071 bis 2100) steigt die Temperatur im A2-Szenario mit 3,1 K im Median (2,3 K bis 4,1 K Spannweite) wesentlich stärker als in den moderateren A1B- (Median: 2,7 K, Spannweite: 1,8 K bis 4,5 K) und B1 (Median 1,7 K, Spannweite: 1,3 K bis 3,2 K) Szenarien (Prein et al., 2011). Die mittleren Projektionen der CMIP5 / RCP-Simulationen zeigen ähnliche Temperaturänderungen (für Zentraleuropa mehr als 1 K für das Szenario RCP2.6 und mehr als 5 K im pessimistischsten Szenario RCP8.5 bis Ende des 21. Jahrhunderts; IPCC (2013): WG1, Annex 1).

In Nordeuropa wird die stärkste Erwärmung im Winterhalbjahr erwartet. Christensen et al. (2007) erklären dies durch eine verkürzte Schneedeckendauer. In Südeuropa wird hingegen die stärkste Erwärmung im Sommer erwartet, was teilweise durch eine erhöhte Austrocknung des Bodens bedingt sein dürfte (z. B. Faggian und Giorgi 2009). Plavcová und Kyselý (2013) zeigen, dass sich in einigen CMIP3-Projektionen auch die Häufigkeit des Zirkulationsmusters Westwetterlage verschiebt: häufiger im Winter- und seltener im Sommerhalbjahr. Dies kann das unterschiedliche Erwärmungsmuster durch die veränderte Zufuhr maritimer Luftmassen erklären. Eine Veränderung der atmosphärischen Zirkulation wird aber nicht als wesentlichste Ursache der projizierten Erwärmung angesehen (z. B. Rauthe und Paeth, 2004; Stephenson et al., 2006). In der freien Troposphäre (über der atmosphärischen Grenzschicht ~ 1 000 bis 10 000 m) ist die Temperaturzunahme stärker als in Bodennähe, was klimatologisch zu einem geringeren vertikalen Temperaturgradienten und potentiell zu einer Stabilisierung der Troposphäre führt (Prein et al., 2011).

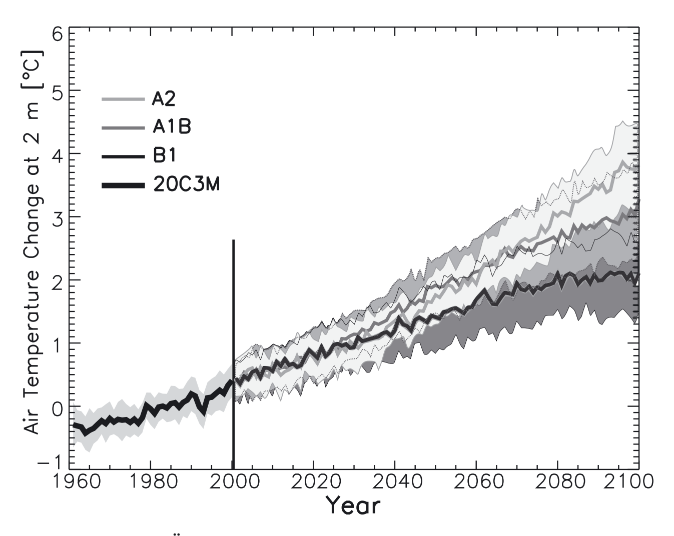


Abbildung 4.1 Änderung der bodennahen Temperatur im CMIP3-Ensemble über Europa (im Vergleich zur bodennahen mittleren Temperatur im Referenzzeitraum 1971–2000). Dicke Linien zeigen die Entwicklung der Ensemblemittelwerte für drei verschiedene Emissionsszenarien, Schattierungen zeigen die Standardabweichung des CMIP3-Ensembles. Adaptiert nach Prein et al. (2011)

Figure 4.1 Change in European near surface air temperatures from the CMIP3 ensemble (relative to the average temperature of the reference period 1971–2000). Thick lines indicate the multi-model mean of three different emission scenarios. Shaded areas indicate the standard deviation of the CMIP3 ensemble. Adapted after Prein et al. (2011)

Eine Intensivierung der interannualen Schwankungen der Sommertemperaturen ist wahrscheinlich (Giorgi und Bi, 2005; Rowell, 2005; Clark et al., 2006). Dies wird erklärt mit einer geringeren sommerlichen Bodenfeuchte, wodurch der dämpfende Effekt auf die Temperaturvariabilität durch Verdunstungskühlung und Wärmespeicherung im Boden verringert wird, und einem größeren Land-Meer-Kontrast im Sommerhalbjahr (Rowell, 2005; Lenderink et al., 2007; Seneviratne et al., 2006; Hirschi et al., 2011). Damit würde ein beobachteter Trend in der Andauer von sommerlichen Hitzewellen in West- und Zentraleuropa fortgesetzt (Della-Marta et al., 2007). In Beobachtungsdaten im Alpenraum, die bis zu 250 Jahre zurückreichen, ist allerdings keine Intensivierung der interannualen Schwankungen von Monatsmittelwerten ersichtlich (Böhm et al., 2001; Hiebl et al., 2009). Des Weiteren zeigen die globalen Klimaprojektionen im Sommer einen Anstieg der Temperaturvariabilität auf Tagesbasis mit besonders starken Änderungen in südlichen und zentralen Teilen Europas (Hegerl et al., 2004; Meehl und Tebaldi, 2004; Clark et al., 2006). Dagegen wird eine Abnahme der winterlichen interannualen (Räisänen, 2001; Giorgi und Bi, 2005; Rowell, 2005) und täglichen (Hegerl et al., 2004; Kjellström et al., 2007) Temperaturvariabilität projiziert. Dies wird durch eine reduzierte Schneedeckendauer und eine starke Erwärmung der kalten Extreme erklärt.

Durch die generelle Erwärmung, zusammen mit den Veränderungen in der Variabilität, ist es sehr wahrscheinlich, dass Hitzewellen in Häufigkeit, Intensität und Dauer zunehmen werden (Barnett et al., 2006; Clark et al., 2006; Tebaldi et al., 2006; Seneviratne et al., 2012; Kharin et al., 2013). Umgekehrt ist es sehr wahrscheinlich, dass die Anzahl von Frosttagen abnimmt (Tebaldi et al., 2006; Kharin et al., 2013).

4.1.2 Niederschlag, Luft- und Bodenfeuchte

In Bezug auf das Klimaelement Niederschlag ist die Übereinstimmung in den CMIP3-Projektionen wesentlich geringer als in Bezug auf Temperatur. Klar ersichtlich ist aber ein Nord-

Süd Kontrast in Europa mit einer zukünftigen Niederschlagsabnahme (der Mittel in 1980 bis 1999 und 2080 bis 2099) zwischen 4 % bis 27 % im Süden und einer Zunahme zwischen 0 % bis zu 16 % im Norden im A1B-Szenario (Christensen et al., 2007). Die Bereiche mit zu- und abnehmenden Niederschlägen unterliegen einer saisonalen Oszillation (Giorgi und Coppola, 2007), wobei sich die Zone mit Niederschlagsabnahmen im Sommer nach Norden und im Winter zurück nach Süden verschiebt. Diese Oszillation hängt mit einer saisonalen Nord-Süd-Migration eines Gebiets verstärkter antizyklonaler Zirkulation über dem nordöstlichen Atlantik zusammen (Giorgi und Coppola, 2007). Die Auswirkungen von Zirkulationsänderungen auf den Niederschlag thematisiert auch eine Studie von van Ulden und van Oldenborgh (2006). In dieser Studie wird gezeigt, dass es zu einem zusätzlichen Anstieg des Winterniederschlags in Zentraleuropa durch eine Intensivierung der Westwetterlagen kommen kann. Im Sommer hingegen ist eine Niederschlagsabnahme mit mehr Ostwetterlagen und antizyklonalen Strömungen verknüpft.

In Nord- und Zentraleuropa werden wahrscheinlich auch Niederschlagsextreme in Intensität und Häufigkeit zunehmen (z. B. Semenov und Bengtsson, 2002; Voss et al., 2002; Hegerl et al., 2004; Wehner, 2004; Kharin und Zwiers, 2005; Tebaldi et al., 2006; Benestad, 2007). Für den Mittelmeerraum ist eine Änderung von Extremniederschlägen ungewiss. Jedoch ist in Süd- und Zentraleuropa durch einen Rückgang der Anzahl von Niederschlagtagen (z. B. Semenov und Bengtsson, 2002; Voss et al., 2002; Heinrich et al., 2012) und eines Anstieges der Dauer der längsten Trockenperioden (z. B. Voss et al., 2002; Tebaldi et al., 2006) ein erhöhtes Risiko für Dürren wahrscheinlich. Dieselben Studien zeigen keine wesentlichen Änderungen in der Länge von Trockenperioden in Nordeuropa. Für den Zeitraum ab 1950 finden Sheffield et al. (2012) geringe Veränderungen in der globalen Dürrestatistik und warnen vor zu stark vereinfachender Diagnostik (z. B. dem Palmer Trockenheitsindex PDSI), die nicht ausreichend die komplexen Dürreprozesse und Rückkopplungen zwischen Temperatur-, Niederschlags-, Bodenfeuchteänderungen etc. berücksichtigt.

Eine sehr wahrscheinliche Folge des Temperaturanstiegs am Ende des 21. Jahrhunderts ist eine Verkürzung der Zeit in der Bedingungen für Schneefall herrschen und daher ist eine Verringerung der mittleren Schneehöhe in den meisten Regionen Europas zu erwarten (Rowell, 2005). Für den Alpenraum wird von einem Anstieg der Schneefallgrenze um 300–600 m bis zum Ende des Jahrhunderts (Gobiet et al., 2013), beziehungsweise mit etwa 120 m pro 1 K Erwärmung (Hantel und Maurer, 2011) gerechnet (siehe auch Abschnitt 4.3.3).

Mariotti et al. (2008) zeigen, dass die CMIP3-Projektionen mit sehr hoher Übereinstimmung im Mittelmeerbereich einen Rückgang von 20 % der Oberflächenwasserverfügbarkeit an Land und einen Anstieg 24 % des Frischwasserverlustes über dem Mittelmeer projizieren. Eine Abnahme der Bodenfeuchte im Mittelmehrraum und Zentraleuropa ist wegen der verringerten Niederschläge und der erhöhten Verdunstung im Frühling und Sommer sehr wahrscheinlich (Douville et al., 2002; Wang, 2005). In Nordeuropa stimmen die CMIP3-Projektionen bezüglich einer möglichen Bodenfeuchteänderung nicht überein (Wang, 2005).

Der projizierte Anstieg der spezifischen Feuchte in der Troposphäre ist konsistent mit einer erhöhten Wasserspeicherfähigkeit der Atmosphäre durch Erwärmung (z. B. Prein et al., 2011). Dies bedeutet im Mittel über Europa eine Zunahme der spezifischen Feuchte bis zu 30 % in der unteren Troposphäre bei gering veränderter relativer Feuchte. In den oberen Schichten der Troposphäre muss mit mehr als doppelt so hohem Anstieg (Prein et al., 2011) der spezifischen Feuchte gerechnet werden.

4.1.3 Wind

Ob Änderungen in den Windgeschwindigkeiten über Europa auftreten, ist ungewiss. Eine Reihe von Publikationen (z. B. Schmidt und von Storch, 1993; Bärring und von Storch, 2004; Alexanderson et al., 2000; Matulla et al., 2008; Matulla et al., 2012) zeigt, dass sich in den Beobachtungsdaten der letzten Jahrhunderte, die bereits von zunehmenden anthropogenen Treibhausgasemissionen geprägt waren, keine Veränderung der Sturmaktivität erkennen lässt. Mehrere Studien (z. B. Zwiers und Kharin, 1998; Knippertz et al., 2000; Leckebusch und Ulbrich, 2004; Prein et al., 2011) deuten auf einen Anstieg der mittleren und / oder extremen Windgeschwindigkeiten in Nord und / oder Zentraleuropa hin. Dies ist konsistent mit dem projizierten Anstieg des Nordatlantischen Oszillationsindexes in den CMIP3-Projektionen (Meehl et al., 2007). Leckebusch et al. (2007) zeigen, dass für das Vereinigte Königreich und Deutschland ein Anstieg von durch Sturm verursachten Schäden von bis zu 37 % möglich ist. Daneben kann auch die interannuelle Variabilität von Extremereignissen steigen, wodurch sich das Risiko von extremen Sturmereignissen und dadurch induzierten Verlusten erhöhte (Leckebusch et al., 2007; Pinto et al., 2007). Im Alpenraum geben die Projektionen mit globalen Klimamodellen jedoch keine einheitlichen Hinweise auf zunehmende Windgeschwindigkeiten oder Windextreme (siehe auch Abschnitt 4.3.3).

4.1.4 Wetterlagen

Unter einer Wetterlage wird ein typischer Zustand der Atmosphäre über einem bestimmten Gebiet (z. B. Zentraleuropa) verstanden. Dabei wird meist ein zeitlicher Mittelwert aus mehreren Stunden (3-stündig bis 24-stündig) betrachtet. Zur Charakterisierung dieses Zustands werden räumliche Muster verschiedener Parameter, wie z. B. des Luftdrucks, des Geopotentials oder der Temperatur, verwendet (Phillip et al., 2010: EU COST Initiative 733).

Unterschiedliche Wetterlagen (z. B. die zyklonale Westlage) werden durch Variationen der allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre ausgelöst. Die jeweiligen Wetterlagen bestimmen über charakteristische physikalische Prozesse (z. B. Staulage im Luv eines Gebirges) stark das lokale und regionale Wettergeschehen über dem jeweiligen Gebiet. Ist aus langjährigen Wetterbeobachtungen ein empirischer Zusammenhang zwischen lokalem und regionalem Wettergeschehen mit bestimmten Wetterlagen bekannt, dann lässt sich durch Bestimmung der Statistik der Wetterlagen, die aus globalen Klimaprojektionen schätzbar ist, auch Information über die lokale und regionale Klimaentwicklung ableiten. Dies setzt eine Stationarität des empirisch gefundenen Zusammenhangs auch für eine zukünftige Klimaentwicklung voraus. Mögliche Prozessketten, die globale Phänomene (z. B. El Niño-Southern Oszillation, Madden-Julian-Oszillation) über Wetterlagen mit dem regionalen Wetter und Klima im Alpenraum verknüpfen, sind in Wanner et al. (1997) dargestellt. Insbesondere extreme Wetterereignisse sind nicht zufällig in ihrem Auftreten, sondern sind systematisch mit bestimmten Zirkulationsmustern und Wetterlagen verbunden (Jacobeit et al., 2009).

Neben der Statistik der Wetterlagen (Häufigkeit, Andauer, Abfolge) kann es auch zu Veränderung der Ausprägung typischer Wetterlagen (z. B. wärmere Luftmasse bei ähnlichen Druckmustern) kommen. Ein Teil des über Europa beobachteten Temperaturanstiegs (im Zeitraum 1850 bis 2003) lässt sich durch eine Veränderung der Häufigkeit bestimmter Wetterlagen erklären (Phillip et al., 2007). Ob die Veränderung der täglichen Zirkulationsmuster rein zufälliger Natur ist oder durch die globale Erwärmung ausgelöst wird, bleibt darin zunächst offen. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts dominierten in Mitteleuropa bis in die späten 1920er Jahre hinein zonale (Ost-West gerichtete) Zirkulationsformen. Danach zeigt sich bis Mitte der 1970er Jahre eine Zunahme der Häufigkeit von meridionalen Zirkulationsformen (Wanner et al., 1997). Bis zum Ende des 20. Jahrhunderts wurde eine stetige Zunahme des Luftdrucks im Alpenraum beobachtet, die sich durch eine deutliche Zunahme in der Andauer von antizyklonalen Wetterlagen (im Allgemeinen Hochdruckgebiete) über West- und Südwesteuropa erklären lässt. Im Bereich der Westalpen nahmen im Zeitraum 1946 bis 1994 so genannte konvektive Wetterlagen zu Lasten von advektiven Wetterlagen zu. Die Trends sind im Winter am stärksten und werden durch eine Zunahme der Persistenz von Hochdruckgebieten verursacht (Stefanicki et al., 1998). Im Zeitraum 1979 bis 2002 finden Fricke und Kaminsky (2002) eine ausgeprägte Zunahme von Südwest-Wetterlagen bei einer gleichzeitigen Abnahme von Nordwestwetterlagen. Des Weiteren hat die Häufigkeit von zyklonalen Westlagen – solche bei denen ein Tiefdruckgebiet vom Atlantik her ostwärts über Europa zieht – vor allem im Sommerhalbjahr der Jahre 1881 bis 1998 abgenommen. In einer anderen Arbeit (Albrecht und Dietzer, 2006) wurden für Süd-Deutschland meridionale-, zonale- und gemischte Zirkulationsformen hinsichtlich Langzeittrends untersucht. Im Winterhalbjahr nehmen dabei von 1950 bis 2000 zonale Zirkulationsformen deutlich ab, meridionale hingegen zu. Die Ergebnisse für das Sommerhalbjahr sind von einer starken multidekadischen Variabilität geprägt und zeigen keine signifikanten Trends.

Zusammenfassend nimmt in Mitteleuropa bis dato der Einfluss meridionaler Zirkulationsformen zu wohingegen der Einfluss von Wetterlagen, die vom Atlantik her kommen, zurückgeht. Es existieren bereits für die Vergangenheit Unterschiede zwischen den verschiedenen Untersuchungen, da die Ergebnisse von der Festlegung des Untersuchungsgebiets und der Wahl der Wetterlagenklassifikation abhängen.

Veränderungen der großräumigen Zirkulation in der Klimazukunft werden mit Hilfe von globalen Klimamodellen untersucht. In einer Studie konnten von 23 untersuchten Klimamodellen lediglich acht Modelle die beobachtete Zirkulation und ihre Variabilität über Europa gut wiedergeben (van Ulden und van Oldenborgh, 2006). Zu einem sehr ähnlichen Ergebnis kommen auch Casado und Pastor (2011). Riediger und Gratzki (2014) untersuchen die simulierten Wetterlagen in einem Ensemble von sechs globalen Klimamodellen für den Zeitraum 1971 bis 2000 und zeigen, dass die Unsicherheit der Wetterlagenhäufigkeit des mittleren absoluten Fehlers des Ensemblemittels bei knapp 2 % liegt. Dabei werden Westlagen insbesondere im Sommerhalbjahr zu häufig und Ostlagen zu selten simuliert.

In der Klimazukunft zeigt sich in den Simulationen der Globalmodelle eine Zunahme der Häufigkeit und Verstärkung von antizyklonalen Zirkulationsformen über dem Westen und Südwesten Europas (Abbildung 4.2; Riediger und Gratzki, 2014). Das sommerliche Azorenhoch erstreckt sich demnach weiter nach Nordosten bis über Europa (z. B. Belleflamme,

2011). Plavcová und Kyselý (2013) folgern allerdings aus Untersuchungen von Projektionen dreier verschiedener globaler Modelle, dass nur eine winterliche Erwärmung in Zentraleuropa durch eine Veränderung der Wetterlagenstatistik erklärt wird (durch die Zunahme von Westlagen). Hier wird ein dringender Forschungsbedarf in Bezug auf die Stationarität des Zusammenhangs von Wetterlagen und lokalem und regionalem Klima deutlich.

4.2 Regionale Klimamodellierung
4.2 Regional climate modelling

4.2.1 Einleitung

Auch wenn große Fortschritte bei der Entwicklung von globalen Klimamodellen gemacht wurden und die Prozesse, die auf Skalen von einigen hundert Kilometern erfassbar sind, adäquat abgebildet werden, ist es mit Klimaprojektionen globaler Klimamodelle nicht möglich, direkt auf regionale oder lokale Klimaänderungen zu schließen (von Storch et al., 1993; von Storch 1995; Meehl et al., 2007). Die räumliche und zeitliche Information ist somit für die Klimafolgenforschung, welche die Auswirkungen von Klimaszenarien auf sozio-ökonomische Strukturen und Ökosysteme abschätzt, nicht ausreichend (Lexer et al., 2000; Maraun et al., 2010). Um Aussagen über die Auswirkungen des Klimawandels in Österreich treffen zu können, sind daher hochaufgelöst modellierte Klimaentwicklungen (mit räumlichen Gitterauflösungen von wenigen 10 km und besser) im Europäischen Alpenraum für die Vergangenheit und die Zukunft nötig.

Verfahren, welche die Projektionen der globalen Modelle unter Berücksichtigung regionaler und lokaler Prozesse (z. B. detaillierte Orographie, Land-See Kontraste) auf die gewünschten kleinen Skalen hinunterskalieren, werden „Downscaling"-Verfahren (von Storch et al., 1993) genannt. Grundlegende Annahmen beim Downscaling sind, dass das regionalskalige Klimageschehen vom großräumigen Klimageschehen bestimmt wird und dass das großräumige Klimageschehen in den globalen Klimaprojektionen realistisch wiedergeben wird. In der Klimamodellierung werden zwei grundlegende Downscaling-Zugänge unterschieden:

- Dynamisches Downscaling basiert auf Verfahren zur Lösung der physikalischen Grundgleichungen, die auch kleinskalige physikalische Prozesse der Atmosphäre beschreiben, die nicht von globalen Klimamodellen erfasst werden. Dies kann durch Anwendung eines regionalen Klimamodells mit hoher räumlicher Auflösung des Rechengitters für einen kleinen geographischen Ausschnitt erreicht werden (vgl. Giorgi und Bates, 1989; Giorgi und Mearns, 1991).

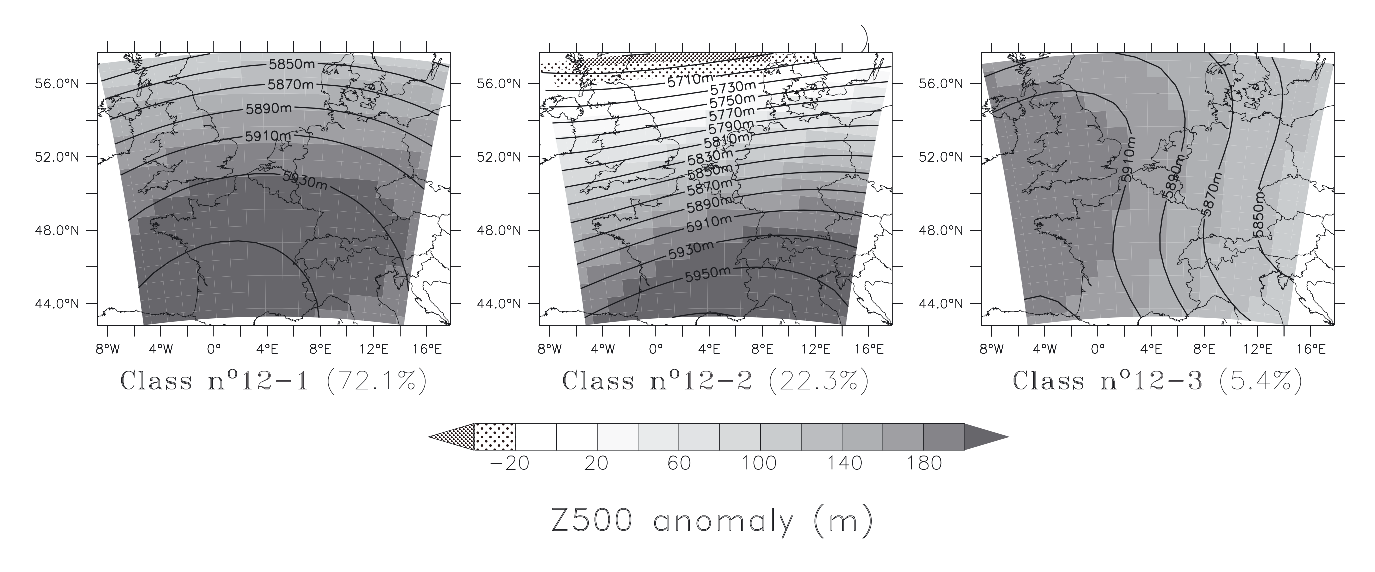


Abbildung 4.2 Anomalien der geopotentiellen Höhe auf dem Druckniveau 500 hPa im Globalmodell HadGEM1 bei Verwendung des Szenarios SRES A1B (2081–2100 minus 1961–1990). Über Westeuropa kommt es zu einem Druckanstieg durch das sich nach Osten ausdehnende Azorenhoch. Adaptiert nach Belleflamme et al. (2011)

Figure 4.2 Anomaly of the geopotential height at the 500 hPa level in the global model HadGEM1 and the SRES A1B scenario (2081–2100 minus 1961–1990). The pressure in Western Europe is increasing, due to an eastwards extension of the Azores High. Adapted after Belleflamme et al. (2011)

- Empirisches / statistisches Downscaling verwendet Informationen aus den globalen bzw. regionalen Klimaprojektionen (z. B. die zeitliche Abfolge von Wetterlagen) und auf der lokalen Skala (z. B. Beobachtungszeitserien der Temperatur einer Messstation und anderer Parameter für die Klimaprojektionen gemacht werden sollen). Diese Informationen werden mit statistischen Methoden in Beziehung gesetzt. Der abgeleitete statistische Zusammenhang ermöglicht es, eine lokalskalige Klimaentwicklung bei gegebenen globalen (regionalen) Klimaprojektionen abzuschätzen (vgl. von Storch et al., 1993).

Diese beiden Zugänge basieren zwar auf unterschiedlichen Prinzipien, werden in der modernen Klimamodellierung jedoch ergänzend eingesetzt, um bestmögliche regionale und lokale Klimaprojektion zu erstellen. Im folgenden Abschnitt 4.2.2 werden die Methoden der regionalen Klimamodellierung vorgestellt, diskutiert und verglichen. Abschnitt 4.2.3 gibt einen Überblick über die Aktivitäten der regionalen Klimamodellierung mit Bezug auf Österreich und Abschnitt 4.2.4 fasst den aktuellen Forschungsbedarf in der regionalen Klimamodellierung zusammen. Dies ergibt eine notwendige Hilfestellung bei der Bewertung der Ergebnisse regionaler Klimaprojektionen, die in Abschnitt 4.3 zusammengefasst werden.

4.2.2 Methoden in der regionalen Klimamodellierung

Dynamisches Downscaling

Die Funktionsweise von regionalen Klimamodellen (RCM) entspricht etwa der Funktionsweise von globalen Klimamodellen (siehe Band 1, Kapitel 1). Zentrales Element ist ein numerischer Lösungsalgorithmus, der die physikalischen Grundgleichungen, welche die Prozesse in der Atmosphäre beschreiben, näherungsweise löst. Dazu ist ein Rechengitter notwendig, welches die Auflösung des Klimamodells bestimmt. Ein feineres Rechengitter erlaubt eine bessere Darstellung der Orographie und anderer Prozesse im Modell (siehe Abbildung 4.3). Variablen, die durch den Lösungsalgorithmus auf dem Rechengitter berechnet werden, werden als prognostische Variablen (üblicherweise Druck, Temperatur, Geschwindigkeitskomponenten sowie ein Maß für die Feuchte der Luft) bezeichnet (vgl. Pielke, 2001). Alle kleinerskaligen Prozesse, welche durch das Rechengitter nicht mehr erfasst werden können, werden sub-gitterskalige Prozesse genannt und auf Zusammenhänge der prognostischen Variablen zurückgeführt und vereinfacht abgebildet. Diese vereinfachte Abbildung wird als „Parametrisierung" bezeichnet (vgl. Pielke, 2001; Stensrud, 2007). Parametrisiert werden müssen z. B. der Strahlungsgang durch die Atmosphäre, die planetare Grenzschicht, hochreichende Konvektion, Phasenumwandlung von atmosphärischem Wasser sowie Interaktionen zwischen Boden, Vegetation und Atmosphäre. Regionale Klimamodelle bieten heute auch die Möglichkeit des Ankoppelns komplexer externer Modelle, um je nach Anwendungsfall wichtige Komponenten des Klimasystems adäquat zu erfassen (z. B. regionale Ozeanmodelle, Modelle der Atmosphärenchemie, Boden-Vegetations-Modelle).

Die Entwicklung von regionalen Klimamodellen startete mit der steigenden Wahrnehmung des Klimawandels in den 1980er Jahren (Dickinson et al., 1989; Giorgi und Bates, 1989; Giorgi, 1990; Giorgi und Mearns, 1991). Das regionale Klimamodell „REGional Climate Model" (RegCM), war das erste Modell, das für regionale Klimasimulationen von Filippo Giorgi und seinem Team am „National Center for Atmospheric Research" (NCAR) in den USA entwickelt wurde. Es leitete sich von einem damals operationellen regionalen Wettervorhersagemodell ab. Änderungen und Modifikationen in der Modellierung des Strahlungsgangs, der Interaktion zwischen Biosphäre und Atmosphäre, der planetaren Grenzschicht, der Cumulus-Konvektion und der Phasenumwandlung des Wassers in der Atmosphäre machten aus dem meteorologischen Vorhersagemodell ein Modell, das sich für Klimastudien eignete. Mittlerweile gibt es eine Reihe weiterer regionaler Klimamodelle: HIRHAM (Christensen et al., 1996), REMO (Jacob und Podzun, 1997), ALADIN-Climate (Farda et al., 2010), COSMO-CLM (Böhm et al., 2006) und weitere. Diese Modelle werden von Entwicklergemeinschaften weiterentwickelt und betrieben. Beispielsweise wird das Modell REMO wesentlich am Max-Planck Institut für Meteorologie, Hamburg, dem Climate Service Centre, Hamburg, und anderen Einrichtungen verwendet. COSMO-CLM wird von der CLM Community[1] mit derzeit etwa 50 institutionellen Mitgliedern weiterentwickelt und verwendet.

Die verschiedenen Modelle sind in ihrer Struktur sehr ähnlich, unterscheiden sich aber in spezifischen Anpassungen für die Abbildung bestimmter Prozesse. Die genannten Modelle wurden in einer Vielzahl von Studien in Europa angewendet (siehe Abschnitt 4.3). HIRHAM zielt vor allem auf die Simulation des Klimas hoher Breiten, wie der Arktis (Dethloff et al., 1996), Skandinaviens (Christensen et al., 1998) und der Antarktis (van Lipzig et al., 1998), ab. Mit COSMO-CLM besteht auch große Erfahrung in tropischen Klimaten (Dobler

[1] www.clm-community.eu

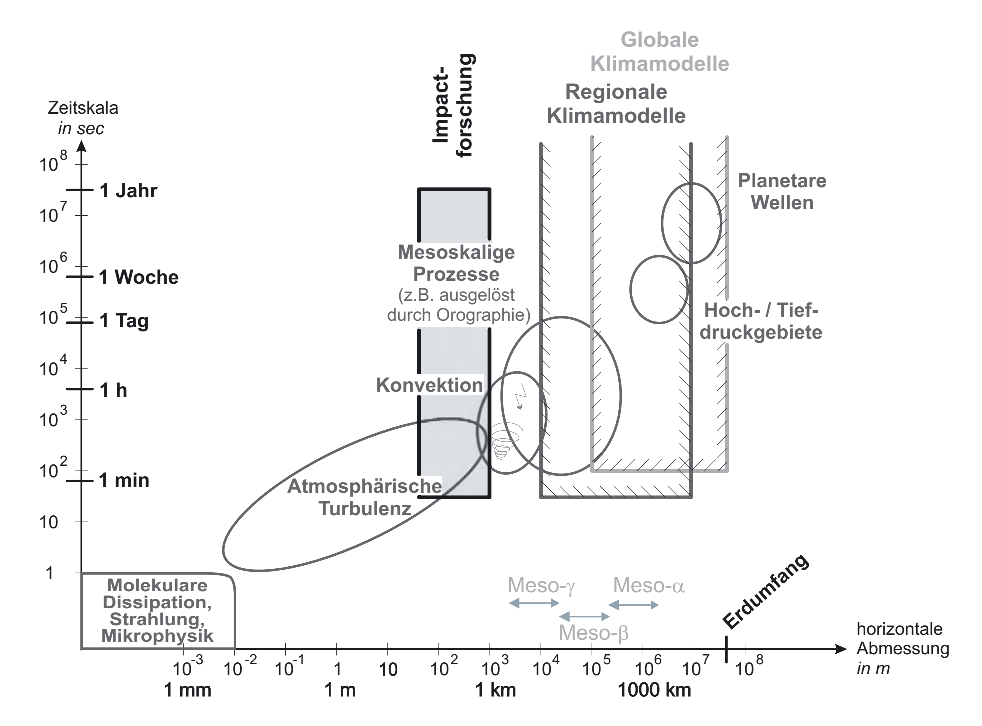


Abbildung 4.3 Atmosphärische Prozesse und deren Einteilung in Skalen. Die Wirkungsbereiche moderner globaler (hellgrau) und regionaler (dunkelgrau) Klimamodelle sowie die Anforderungen aus der Impactforschung (schwarz) sind schematisch dargestellt. Adaptiert nach: Deutscher Wetterdienst DWD

Figure 4.3 Typical scales of atmospheric processes. The resolved scales in state-of-the-art global climate models are indicated in light grey, regional models in dark gray and relevant scale in impact research in black. Adapted after: Deutscher Wetterdienst, DWD

und Ahrens, 2011; Kothe et al., 2013; Panitz et al., 2013). Es ist daher vorteilhaft, Ensembles von Projektion verschiedener Modelle zu untersuchen, um die jeweiligen Vorteile der verschiedenen Modelle zu nutzen.

Der Vorteil des feineren Rechengitters geht einher mit höheren Rechenkosten, daher berechnen die regionalen Modelle Klimaprojektionen auf einem geographisch begrenzten Gebiet. Dazu benötigen sie Informationen über den Zustand der Atmosphäre an den seitlichen Rändern des Rechengebietes (seitliche Randbedingungen) sowie detaillierte Informationen über die Beschaffenheit der Erdoberfläche (untere Randbedingungen). Üblicherweise werden die seitlichen Randbedingungen durch globale Klimaprojektionen oder (zum Zweck der Modellevaluation) durch Re-Analysedaten (Re-Analysen sind die beste mit Hilfe von Beobachtungsdaten gewonnene Beschreibung des vergangenen Wettergeschehens auf einem globalen Gitternetz) vorgegeben. Die Erdoberfläche (Seehöhe, Landnutzung, etc.) wird durch verfügbare Beobachtungsdatensätze beschrieben.

Regionale Klimamodelle lassen sich auch durch gröbere regionale Klimaprojektionen an den seitlichen Rändern antreiben. Dadurch lässt sich der Detailgrad der Klimaprojektionen sukzessive erhöhen. Dieses spezielle Verfahren wird als „nesting“ bezeichnet. Es existieren auch regionale Modelle, in denen ein grobes und ein feineres Nest interagieren (Smolarkiewicz und Grell, 1992). So ist man in der Lage, ein breiteres Spektrum an unterschiedlichen Skalen sowie skalenübergreifende Wechselwirkungen besser zu erfassen. Allerdings werden durch zusätzliche Nestungsstufen auch Störungen und damit Modellunsicherheiten über die Gittersprünge an den Rändern in die Simulationen eingebracht. Eine Diskussion dieser Problematik findet sich in Beck et al. (2004) für die Anwendung eines regionalen Klimamodells im Alpenraum.

Alternativ zu diesen Nestungsstrategien gibt es einige wenige globale Klimamodelle, die eine variable horizontale Gitterauflösung erlauben. Diese Modelle können über der Region, die von speziellem Interesse ist, fokussieren. Ein wichtiges Beispiel ist das Modell ARPEGE-Climate (Déqué et al., 1994) des französischen Wetterdienstes Meteo France, welches skalenübergreifende Wechselwirkungen auf dem Rechengitter gut abbilden kann, aber auch auf sehr verschiedenen Skalen sub-gitterskalige Prozesse parametrisieren muss, wodurch Unsicherheiten in die Simulationen eingebracht werden.

Durch die begrenzte Gitterauflösung, die notwendigen Parametrisierungen, nicht perfekte Randbedingungen und physikalische Eingangsparameter (Orographie, Landbedeckung, etc.) haben die regionalen Klimaprojektionen mit dynamischem Downscaling Unsicherheiten. Im Folgenden werden beispielhaft einige Evaluationsstudien von Simulationen zur Bestimmung von Unsicherheiten mit dem regionalen Klimamodell COSMO-CLM (CCLM) diskutiert. Dabei liegt der Schwerpunkt der Diskussion auf dem Alpenraum. Eine generelle Diskussion von Modellunsicherheiten findet in Band 1, Kapitel 1 sowie im nachfolgenden Abschnitt 4.2.3.

Abbildung 4.4 zeigt den Median des mittleren saisonalen Fehlers der Temperatur für den gesamten Alpenraum aus

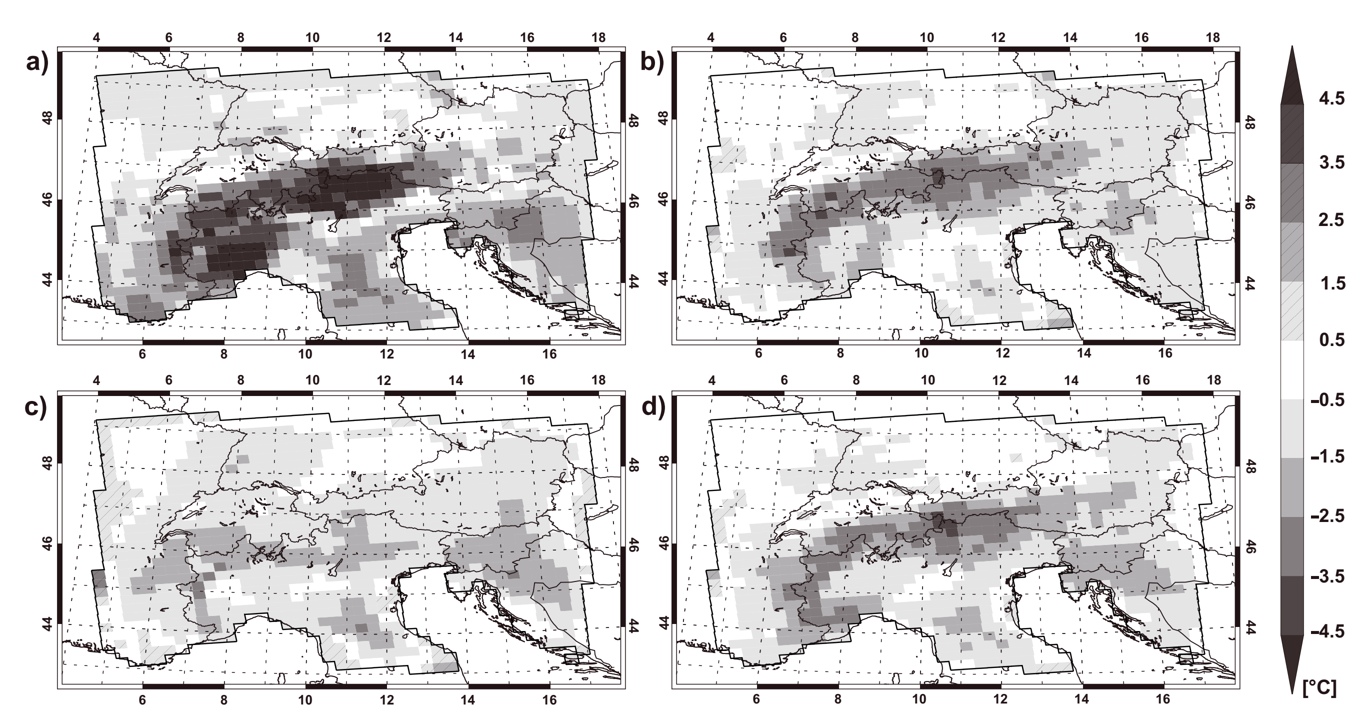


Abbildung 4.4 Median der Abweichungen (Bias) der mittleren saisonalen Temperaturen aus 8 Sensitivitäts-Simulationen des regionalen Klimamodells COSMO-CLM für den Alpenraum von Beobachtungswerten: a) Winter (DJF), b) Frühling (MAM), c) Sommer (JJA), d) Herbst (SON). Blaue Flächen: das RCM ist zu kalt; Rote Flächen: das RCM ist zu warm. Quelle: Suklitsch et al. (2008)

Figure 4.4 Median of the bias of the mean seasonal temperature of 8 simulations of the regional climate model COSMO-CLM in the Alpine region: a) winter (DJF), b) spring (MAM), c) summer (JJA), d) fall (SON). Blue areas indicate a cold bias and red areas a warm bias. Source: Suklitsch et al. (2008)

unterschiedlichen Sensitivitäts-Simulationen mit CCLM, welches mit Re-Analyse Daten (ERA-40) angetrieben wurde (Suklitsch et al., 2008). Die Temperaturen werden in jeder Jahreszeit unterschätzt und umspannen Werte zwischen 0 °C und –4 °C für Österreich. Deutlich ist auch eine Zunahme des mittleren Fehlers in alpinen Gebieten, außer im Sommer, zu erkennen. Zu sehr ähnlichen Resultaten kommt eine Untersuchung (auch für CCLM) von Haslinger et al. (2013), aber mit eher geringerer Temperaturunterschätzung in den Flachländern nördlich des Alpenhauptkamms von 0,0 °C bis –1,5 °C und einer deutlichen Zunahme des mittleren Fehlers mit der Seehöhe (Abweichungen von –3,0 °C bis –4,0 °C über 1 000 m Seehöhe). Als mögliche Gründe für diesen Temperaturfehler können Effekte einer Überschätzung der Wolkenbedeckung oder aber auch Fehler in der Simulation der Oberflächenenergiebilanz genannt werden (vgl. Jaeger et al., 2008; Kothe et al., 2011).

Bei derselben Klimasimulation (Haslinger et al., 2013) bewegt sich der mittlere Fehler des Niederschlags in Österreich in Bereichen von 0 % bis +40 % in den nördlichen Flachländern, in den südöstlichen Gebieten wird der Niederschlag eher unterschätzt mit 0 % bis –20 %. Sehr deutlich ist der mittleren Fehler wiederum, ähnlich wie bei der Temperatur, in den alpinen Bereichen: hier werden die Niederschlagsmengen teilweise um 70 % und mehr überschätzt. Wesentlich ist auch die Betrachtung der Häufigkeitsverteilung des simulierten Niederschlags. Starke Über- bzw. Unterschätzung der Anzahl der Tage mit Niederschlag oder der Niederschlagsintensität kann zu Kompensationseffekten führen. Eine Überschätzung der Intensität bei gleichzeitiger Unterschätzung der Tage mit Niederschlag kann zu sehr geringem mittleren Fehler führen, obwohl die Häufigkeitsverteilung im Modell nicht mit den Beobachtungen übereinstimmt (vgl. Dobler und Ahrens, 2008; Haslinger et al., 2013).

In Vautard et al. (2013) wurde eine Reihe von Modellsimulationen im Rahmen des Projekts EURO-CORDEX (siehe Tabelle 4.1) hinsichtlich Ihrer Fähigkeit, Hitzewellen realistisch wiederzugeben, evaluiert. Die regionalen Rechengitter hatten eine horizontale Gitterdistanz von entweder 50 km oder 12 km. Es zeigte sich, dass insbesondere die gröberen Simulationen die Anzahl der Hitzetage in Hitzewellen überschätzten, die jährliche Abfolge der Hitzewellen der Vergangenheit aber gut wiedergegeben wurde.

Der mittlere Fehler in regionalen Klimasimulationen eines Modells wurde in Bezug auf Windgeschwindigkeiten und -richtungen beispielsweise von Truhetz et al. (2007) unter-

Tabelle 4.1 Zusammenstellung von regionalen Klimamodellierungen, die auch Österreich abdecken
Table 4.1 Collection of regional climate model results that include Austria

Projekt	Region	Gitterdistanz	Szenario	Webadresse
EURO-CORDEX	Europa	50 km, 12 km	RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5	http://www.euro-cordex.net
PRUDENCE	Europa	50 km	SRES A2	http://www.prudence.dmi.dk
reclip:century	Europa, GAR	50 km, 10 km	SRES A1B, B1, A2	http://reclip.ait.ac.at/reclip_century/
ReCliS:NG	GAR	10 km	RCP 2.6, RCP4.5	http://www.uni-graz.at/igam7www/igam7www_forschung/igam7www_reloclim/igam7www_reloclim_projekte/igam7www_reclis_ng.htm
ENSEMBLES	Europa	50 km, 25 km	SRES A1B (A2)	http://ensembles-eu.metoffice.com/
CECILIA	verschiedene europäische Subregionen	10 km	SRES	http://www.cecilia-eu.org/
ALP-IMP	Europe	11 km	Hindcast	http://www.zamg.ac.at/ALP-IMP/

sucht. Die Simulationen wurden mit ERA-40 Re-Analyse-Daten angetrieben und im Gebiet der Hohen Tauern analysiert. Bei einer räumlichen Auflösung von 10 km zeigte das Modell einen mittleren Fehler von –1,8 m / s und einen Root Mean Square Error von 6,3 m / s im Vergleich zu Beobachtungsdaten von sechs Stationen im Untersuchungsgebiet. Abbildung 4.5 zeigt die Verteilung der Fehler von modellierten instantanen Windgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von beobachteten 10-Minuten Mittelwerten. Dabei wird deutlich, dass vor allem die Klassen mit niedrigen Geschwindigkeiten bis 3,0 m / s überschätzt und die Klassen höherer Geschwindigkeiten in zunehmendem Maße unterschätzt werden.

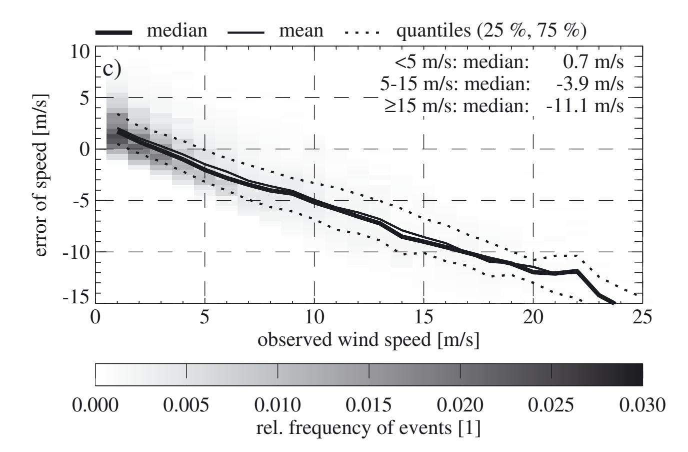


Abbildung 4.5 Unterschiede zwischen modellierten (instantane Modellwerte mit 10 km Auflösung) und beobachteten (10-Minuten Mittelwerte) Windgeschwindigkeiten an sechs repräsentativen Bodenstationen im Gebiet der Hohen Tauern. Adaptiert nach Truhetz et al. (2007)

Figure 4.5 Differences between modelled (model value with 10 km spatial resolution) and observed wind speed at 6 representative stations within the Hohen Tauern. Adapted after Truhetz et al. (2007)

Bei Klimasimulationen und daraus abgeleiteten Klimaänderungssignalen spielen Modellfehler eine bedeutende Rolle: sie sind mitverantwortlich für Unsicherheiten in Klimaänderungssignalen (Palmer et al., 2005). Prein et al. (2011) haben untersucht, wie sich einzelne Unsicherheitskomponenten (natürliche Klimavariabilität, Wahl des Modells, Wahl des Emissionsszenarios) zueinander verhalten. Sie konnten feststellen, dass Unsicherheiten in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts in Europa hauptsächlich (zwischen 50 % und 85 %) aus der Wahl des globalen Klimamodells resultieren, während der Anteil der Emissionsszenarien unter 10 % liegt. Erst in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts gewinnen die Emissionsszenarien zunehmend an Bedeutung und erreichen etwa 35 %. Bei Klimaänderungssignalen aus regionalen Klimamodellen sind deren Unsicherheiten zusätzlich zu berücksichtigen. Déqué et al. (2007, 2012) haben die relativen Beiträge von globalen und regionalen Klimamodellen zur Gesamtunsicherheit in Europa untersucht: mit Ausnahme des Sommerniederschlags sind die Beiträge der globalen Klimamodelle im Allgemeinen größer als die der regionalen Modelle. Diese Aussage trifft auch für den Alpenraum zu. Heinrich und Gobiet (2011) konnten zeigen, dass die Beiträge der regionalen Klimamodelle an der Gesamtunsicherheit der Niederschlagsänderung in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts im Frühling und Sommer etwa 50 % bis 65 % (je nach Region) betragen. Bei der Bewertung von Klimaänderungssignalen müssen diese Unsicherheiten mitdiskutiert werden.

Empirisch / statistisches Downscaling

Die wesentliche Idee des empirischen Downscaling besteht darin, ein statistisches Modell zu formulieren, welches die interessierende, regional- bzw. lokalskalige Klimavariable (den

Prädiktand) abhängig von großskaligen Feldern (den Prädiktoren) formuliert. Das statistische Modell bildet die Beziehung zwischen dem großskaligen und dem lokalskaligen Wettergeschehen ab. Diese Vorgangsweise erinnert an die Arbeit eines Prognostikers, dessen Erfahrungsschatz es ihm erlaubt aus dem großskaligen Zustand der Atmosphäre auf die regionale Ausbildung des Wetters zu schließen. Für die Entwicklung des statistischen Modells müssen regional- bzw. lokalskalige Beobachtungszeitreihen des Prediktanden und Zeitreihen der Prädiktoren für denselben Zeitraum verfügbar sein.

Statistische Verfahren sind relativ einfach realisierbar, benötigen vergleichsweise wenig Computerressourcen und kein detailliertes Wissen über die Beschaffenheit des Geländes. Daher stehen empirische Verfahren einem weiten Kreis von Anwendern offen.

Das empirisch / statistische Downscaling beruht auf folgenden Voraussetzungen:

- Die gewählten Prädiktoren bestimmen die regionale Variabilität des Prädiktanden und werden von einem Klimamodell realistisch beschrieben;
- Die Klimaänderung wird von den Prädiktoren erfasst;
- Die abgeleitete, empirische Beziehung zwischen den Skalen bleibt unter geänderten Klimabedingungen bestehen.

Gängige empirische Downscaling-Verfahren sind die Klassifikationsverfahren, die Wettergeneratoren und die Transferfunktionen, welche im Folgenden kurz beschrieben werden.

Klassifikationsverfahren

Klassifikationsverfahren definieren zuerst Wetterlagen und koppeln sie dann an regionalskalige Klimavariable (z. B. Bárdossy et al., 1995). Die Gewichtung der regionalskaligen Zustände mit der Häufigkeit der dazugehörigen Wetterklassen ergibt das regionalskalige Klima. Verändert sich die Verteilung der Wetterklassen (z. B. in beobachtetem oder projiziertem Klima) im Laufe der Zeit, spricht man von Klimaänderung, die sich dann auch im regionalskaligen Klima ausdrückt. Die Leistung derartiger Verfahren ist davon bestimmt, inwieweit die grobskalige Klimavariabilität durch die Wetterklassen erfasst wird.

Das statistisch-dynamische Downscaling und die Analogmethode sind Beispiele für Klassifikationsverfahren. Statistisch-dynamisches Downscaling (Frey-Buness et al., 1995; Fuentes und Heimann, 2000) fußt auf regionalen Klimamodellsimulationen zur Erzeugung regionalskaliger Strukturen für die verschiedenen Wetterlagen. Diese werden für jede Klasse berechnet. Damit nutzt dieser Zugang die Vorzüge von dynamischem (Beschreibung physikalischer Prozesse mittels dynamischer Modelle) und empirischem (z. B. geringe Rechenzeit) Downscaling. Ein Nachteil ist, dass die Entwicklung eines regionalen Gedächtnisses, welches sich in langzeitlichen regionalen Klimasimulationen entwickeln kann (z. B. über den Wassergehalt in tieferen Bodenschichten), in den kurzen Wetterlagensimulationen nicht möglich ist. Dies wird teilweise ausgeglichen, durch den Vorteil einer Vermeidung von Fehlerakkumulation in den Simulationen.

Die Analogmethode (Zorita et al., 1995; Zorita und von Storch, 1999) sucht zu jedem grobskaligen / synoptischen atmosphärischen Muster die ähnlichste Entsprechung (das „Analogon“) aus einem vorhandenen Datenpool von Beobachtungen. Die lokalskaligen Beobachtungswerte, die dem großskaligen Analogon aus dem Datenpool entsprechen, werden dann dem grobskaligen / synoptischen atmosphärischen Muster (etwa aus einer globalen Klimaänderungssimulation) zugeordnet. Neben der Wahl der Prädiktoren ist die Leistung der Analogmethode abhängig davon, in wie vielen räumlichen Dimensionen die Suche durchgeführt wird, ob nur ein synoptisches Muster oder eine Sequenz von Mustern Verwendung findet und welches Distanzmaß zur Beurteilung von Ähnlichkeit herangezogen wird (Matulla et al., 2007b). Neben seiner vergleichsweisen Einfachheit besteht ein weiterer Vorteil des Verfahrens gegenüber linearen empirisch / statistischen Downscaling-Verfahren darin, dass die meist statistisch normalverteilten synoptischen Felder zur Erzeugung von nicht normalverteilten regionalen Variablen (z. B. täglicher Niederschlag) verwendet werden können.

Wettergeneratoren

Wettergeneratoren geben die statistischen Eigenschaften von meteorologischen Variablen wieder, welche das lokale Klima beschreiben. Dabei produzieren sie zumeist Werte auf der (sub)täglichen Zeitskala. Verschiedene Typen von Wettergeneratoren (z. B. Richardson, 1981; Racsko et al., 1991; Wilks, 1999; Furrer et al., 2007) basieren auf unterschiedlichen Verfahren, tägliche Niederschlagsereignisse zu simulieren. In Semenov et al. (1998) finden sich Vergleiche zwischen verschiedenen Ansätzen. Wettergeneratoren können zur Erzeugung langer Zeitreihen genutzt werden, welche das beobachtete Klima beschreiben, aber auch dazu, das Klima entsprechend Klimaänderungsszenarien zu modellieren. Eine Variante beim Einsatz von Wettergeneratoren zum statistischen Downscaling besteht darin, die Parameter der Wettergeneratoren vom großskaligen Zustand der Atmosphäre steuern zu lassen und derart den lokalskaligen Zustand zu erzeugen (Wilby et al., 1998; Charles et al., 1999; Matulla und Haas, 2003; Ahrens, 2003).

Transferfunktionen

Transferfunktionen gehören zu den am häufigsten verwendeten Downscaling-Verfahren. Dabei gibt es lineare und nichtlineare Methoden. Multiple lineare Regressionsmodelle, die als Prädiktoren entweder Reihen atmosphärischer Variabler an grobskalig aufgelösten atmosphärischen Feldern (Winkler et al., 1997; Sailor und Li, 1999) oder die Koeffizienten der Hauptkomponenten atmosphärischer Felder (Hewitson und Crane, 1992; Matulla et al., 2002) verwenden, sind Beispiele für relativ einfache lineare Methoden. Eine weitere Variante besteht in der Verwendung von gekoppelten Musterpaaren (ein synoptisches und ein regionales Muster). Zu diesen Methoden gehört die Kanonische Korrelationsanalyse (von Storch und Zwiers, 1999), die Singulärwertzerlegung (Bretherton et al., 1992) und die Redundanzanalyse (Tyler, 1982).

Die Kanonische Korrelationsanalyse und die Singulärwertzerlegung maximieren die Korrelation der Gewichtungszeitreihen der typischen Muster jedes Paares. Bei der Redundanzanalyse wird hingegen die simulierte Varianz der Koeffizienten des lokalskaligen Musters maximiert. Mit Hilfe der Kanonischen Korrelationsanalyse wurden beispielsweise für die Iberische Halbinsel (von Storch et al., 1993), die Schweizer Alpen (Gyalistras et al., 1994), Rumänien (Busuioc und von Storch, 1996) und Kamerun (Penlap et al., 2004) Schätzungen für künftige Niederschlagsverteilungen abgeleitet.

WASA (1998) konnte zeigen, dass die Leistung der Redundanzanalyse in der Praxis jener der Kanonischen Korrelationsanalyse ähnelt. Eine weitere Methode bieten die Neuronalen Netze, die – je nach ihrer Komplexität – als lineare oder nichtlineare Downscaling-Methode verwendet werden (Zorita und von Storch, 1999; Trigo und Palutikof, 1999; Hewitson und Crane, 1996; Weichert und Bürger, 1998).

Vergleich von dynamischen und statistischen Methoden

Die vorgestellten Downscaling-Verfahren haben ihre spezifischen Vor- und Nachteile. Aus physikalischer Sicht ist der dynamische Ansatz befriedigender, weil kleinräumigere atmosphärische Prozesse explizit formuliert werden. Das macht jedoch eine detaillierte Kenntnis des Geländes notwendig (Topographie, Bodenbeschaffenheit, etc.). Die Simulation der Prozesse in der Atmosphäre sowie zwischen Hydrosphäre, Boden, Vegetation und Atmosphäre stellen hohe Anforderungen an die Rechen- und Speicherleistung der Recheninfrastruktur dar und machen Hochleistungsrechner, wie sie an Klimarechenzentren eingesetzt werden, notwendig. Tatsächlich stellt der hohe Rechenaufwand eine der bedeutendsten Einschränkungen der regionalen Klimamodelle dar, welcher, trotz andauernder fortschreitender technologischer Entwicklungen, den erreichbaren Horizontalauflösungen sowie der zeitlichen Ausdehnung der Simulationsperioden technische Grenzen setzt. Daher sind auch die Möglichkeiten der Modellevaluation eingeschränkt und die Charakterisierung von Modellfehlern sowie die Abschätzung des Unsicherheitsbereiches von regionalen Klimaänderungssignalen nur approximativ. Außerdem beinhalten Simulationsergebnisse von dynamischen Modellen systematische Abweichungen von Beobachtungsdaten, deren Einfluss auf Klimaänderungsprojektionen diskutiert werden muss.

Empirisches Downscaling benutzt, wie oben erwähnt, Beobachtungsreihen auf den Skalen der globalen Klimamodelle sowie auf der regionalen Skala und setzt diese mittels statistischer Verfahren zueinander in Beziehung. Der physikalische Zusammenhang wird somit implizit erfasst. Die Gültigkeit der statistischen Beziehung außerhalb des Beobachtungszeitraums muss allerdings vorausgesetzt werden. Der Vorteil des empirischen Downscaling ist, dass die Ansprüche an Computerressourcen vergleichsweise gering sind.

Für die regionale Klimamodellierung ist ein Verschmelzen von dynamischen und statistischen Methoden sinnvoll. Stärken der unterschiedlichen Ansätze werden kombiniert, um deren Schwächen zu kompensieren. In der Praxis werden statistische Methoden auf Simulationsergebnisse von regionalen Klimamodellen angewandt, um in der Evaluation festgestellte Abweichungen zu korrigieren. Darüber hinaus können statistische Methoden ein weiteres Downscaling ermöglichen (siehe Abbildung 4.6.) Diese Bemühungen sollen letztendlich dazu führen, den Anforderungen der Klimaimpaktforschung gerecht zu werden. Detaillierte Ausführungen dazu sind in Abschnitt 4.3 zu finden.

4.2.3 Umgang mit Unsicherheiten in Klimaszenarien

Klimaszenarien können nie exakt sein. Ganz im Gegenteil, Klimaszenarien weisen teilweise beträchtliche Unsicherheiten auf und es können in der Regel nur Bandbreiten möglicher zukünftiger Entwicklungen angegeben werden. In diesem Abschnitt wird beschrieben was die Ursachen dieser Bandbreiten sind, wie sie bestimmt werden können, und wie Nutzer von Klimaszenarien damit umgehen können.

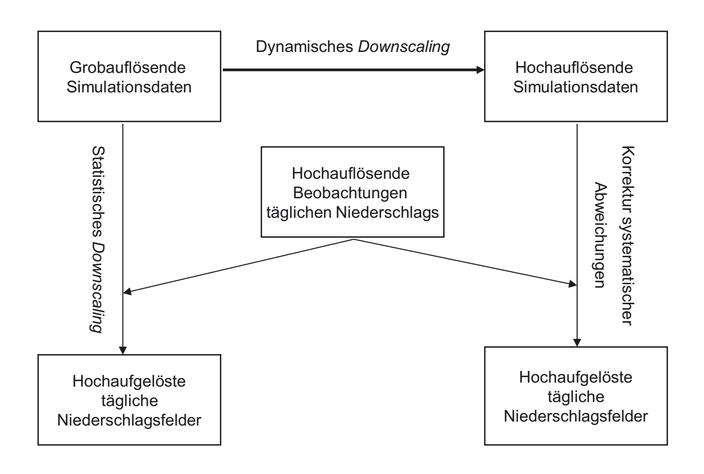


Abbildung 4.6 Dynamisches und statistisches Downscaling in der regionalen Klimamodellierung. Adaptiert nach Dobler und Ahrens (2008)

Figure 4.6 Dynamical and statistical downscaling within the regional climate modelling framework. Adapted after Dobler and Ahrens (2008)

Ursachen der Bandbreite von Klimaprojektionen

Emissionsszenarien

Die zukünftige Entwicklung der Emissionen von klimawirksamen Treibhausgasen und Aerosolen kann nicht vorhergesagt werden, sie kann nur für verschiedene Annahmen zur Entwicklung der Bevölkerung, der Weltwirtschaft, des technologischen Fortschritts und des menschlichen Handelns projiziert werden. Dazu wurden Szenarien entwickelt, die bestimmte zeitliche Verläufe von Treibhausgasemissionen bzw. atmosphärischer Treibhausgaskonzentrationen liefern, die den Klimamodellen als Randbedingung vorgegeben werden. Die Emissionsszenarien, welche den Klimaprojektionen des 4. Sachstandsberichts des IPCC zugrunde liegen, sind als SRES-Szenarien (Special Report on Emission Scenarios, Nakicenovic et al., 2000) bekannt. Den Klimaprojektionen des 5. Sachstandsberichts des IPCC werden neue Szenarien in Form von Repräsentativen Konzentrationspfaden (RCP) vorgegeben (Van Vuuren et al., 2011), die auch in Band 1, Kapitel 1 beschrieben sind. Abbildung 4.1 zeigt die Temperaturentwicklung über Europa in Abhängigkeit von unterschiedlichen SRES-Emissionsszenarien (dicke Linien). Bis zum Ende dieses Jahrhunderts reicht die Bandbreite von etwa +2 °C bis fast +4 °C.

Natürliche Klimavariabilität

Die natürliche Klimavariabilität entsteht einerseits durch externe Einflüsse, wie Schwankungen der Solarstrahlung oder Vulkanausbrüche, und andererseits durch interne, nichtlineare Wechselwirkungen zwischen den Komponenten des Klimasystems. Diese Wechselwirkungen führen dazu, dass das Klimasystem nur teilweise vorhersagbar ist. Das Klimasystem entwickelt sich von nur geringfügig unterschiedlichen Anfangsbedingungen zu sehr unterschiedlichen Zuständen weiter. Die natürliche Variabilität wird abgeschätzt, indem mehrere Klimasimulationen, die sich nur in den Anfangsbedingungen unterscheiden, durchgeführt werden (z. B. Deser et al., 2012). Ergebnisse solcher Simulationen bleiben innerhalb einer gewissen Bandbreite, da der vorhersagbare Anteil des Klimasystems völlig zufällige Ergebnisse verhindert. Mit dieser Ensemblemethode lässt sich auch die Unsicherheit in der Repräsentation der natürlichen Variabilität in Klimamodellen eingrenzen. Es kann aber nicht ausgeschlossen werden, dass in den Modellen unberücksichtigte Prozesse oder Wechselwirkungen auch Überraschungen der zukünftigen Klimaentwicklung außerhalb der abgeschätzten Bandbreite hervorbringen können.

Unsicherheiten der Modellierungsmethoden

Die Unsicherheiten der Modellierungsmethoden sind grundsätzlich von den systemimmanenten Unsicherheiten durch natürliche Klimavariabilität zu unterscheiden, da sie durch wissenschaftlichen Fortschritt verringert werden können. Die Darstellung natürlicher Klimavariabilität kann durch den wissenschaftlichen Fortschritt verbessert werden (z. B. Chen und Lin, 2011). Eine grundsätzliche Beschreibung von Modellunsicherheiten findet sich in Band 1, Kapitel 1. Generell können folgende Typisierungen von Ursachen durchgeführt werden.

- Numerische Beschränkungen: Approximationsfehler entstehen aus der begrenzten Auflösung des Rechengitters. Erst im Idealfall, wenn die Gitterweite gegen Null geht, gehen die diskretisierten Modellgleichungen in die physikalischen Gleichungen über (Großmann und Roos, 2005).
- Parametrisierungen: Modellschwächen ergeben sich auch aus fehlenden oder unzureichenden Parametrisierungen von sub-gitterskaligen, nicht erfassten Prozessen, wie z. B. Strahlung, Bewölkung, Schnee, Konvektion.
- Geo-physikalische Parameter: Unzureichend bekannte geo-physikalische Parameter zur Charakterisierung der Wechselwirkungen zwischen Boden, Vegetation und Atmosphäre (Hechtel et al., 1990; Brunsell et al., 2011) beeinflussen die Modellierung der Prozesse.
- Fehlerfortpflanzung: Fehler von Globalen Klimamodellen, insbesondere hinsichtlich dekadischer Variabilität, atmosphärischer Zirkulation (CutOff, Jet-Splitting) und

Persistenzen (Blocking) (Woollings, 2010; Scaife et al., 2010; Franzke und Woollings, 2011), übertragen sich auf das Regionalmodell.
- Fehlende Rückkopplung: Viele RCM werden durch Einwegkopplung (siehe Abschnitt 4.2) von GCM angetrieben. Dadurch werden wichtige Rückkopplungen auf die großräumige Dynamik unzureichend erfasst (z. B. Tang et al., 2013).

Einige dieser Unsicherheiten in Klimaprojektionen können durch eine Nachbearbeitung der Modellergebnisse zumindest verkleinert werden. Es werden empirisch / statistische Downscaling-Verfahren angewandt, um Abweichungen zu Beobachtungsdaten zu korrigieren und dabei gleichzeitig die Auflösung von RCM zu verbessern (Dobler und Ahrens, 2008; Maraun et al., 2010; Themeßl et al., 2011a,b; siehe auch Abschnitt 4.4).

Wie wichtig sind die einzelnen Beiträge zur Bandbreite?

Um die Größe der Projektionsunsicherheiten bestimmen zu können, werden die Ergebnisse unterschiedlicher und möglichst unabhängig voneinander entwickelter Klimamodelle verglichen und die Bandbreite der Ergebnisse bestimmt. Solche Untersuchungen von „Ensembles" von Klimamodellen sind nur durch weltweite Zusammenarbeit möglich, da einerseits einzelne Forschungsgruppen den enormen Rechenaufwand für die vielen benötigten Klimasimulationen nicht leisten können und andererseits nur durch voneinander weitgehend unabhängige Modellentwicklung gewährleistet werden kann, dass auch die Fehler der Modelle möglichst unabhängig voneinander sind. Dadurch wird die Wahrscheinlichkeit gemeinsamer unbekannter Modellfehler verringert. In Abbildung 4.1 ist die durch Modellunsicherheit entstehende Bandbreite (ausgedrückt durch die Standardabweichung eines Multi-Modell Ensembles) der Temperaturprojektionen durch dünne Linien Bereiche angedeutet.

In den letzten Jahren wurden einige Arbeiten über die Bedeutung der einzelnen Beiträge der Bandbreite in Klimaszenarien veröffentlicht. Einige wichtige Arbeiten in diesem Zusammenhang stammen von Hawkins und Sutton (2009, 2011), die die Komponenten Emissionsszenario, natürliche Variabilität und Modellunsicherheit untersuchen, Prein et al. (2011), die ähnliche Untersuchungen gezielt für Europa durchführten, und Déqué et al. (2007, 2012), die speziell auf den Vergleich der Bandbreiten globaler und regionaler Klimamodelle eingehen. In Abbildung 4.7 ist eine Analyse der Bandbreitenkomponenten für Temperatur und Niederschlagsprojektionen über Europa dargestellt (Prein et al., 2011). Diese Analyse basiert auf allen im 4. Sachstandsbericht des IPCC verwendeten Simulationen (CMIP3, Meehl et al., 2007) mit

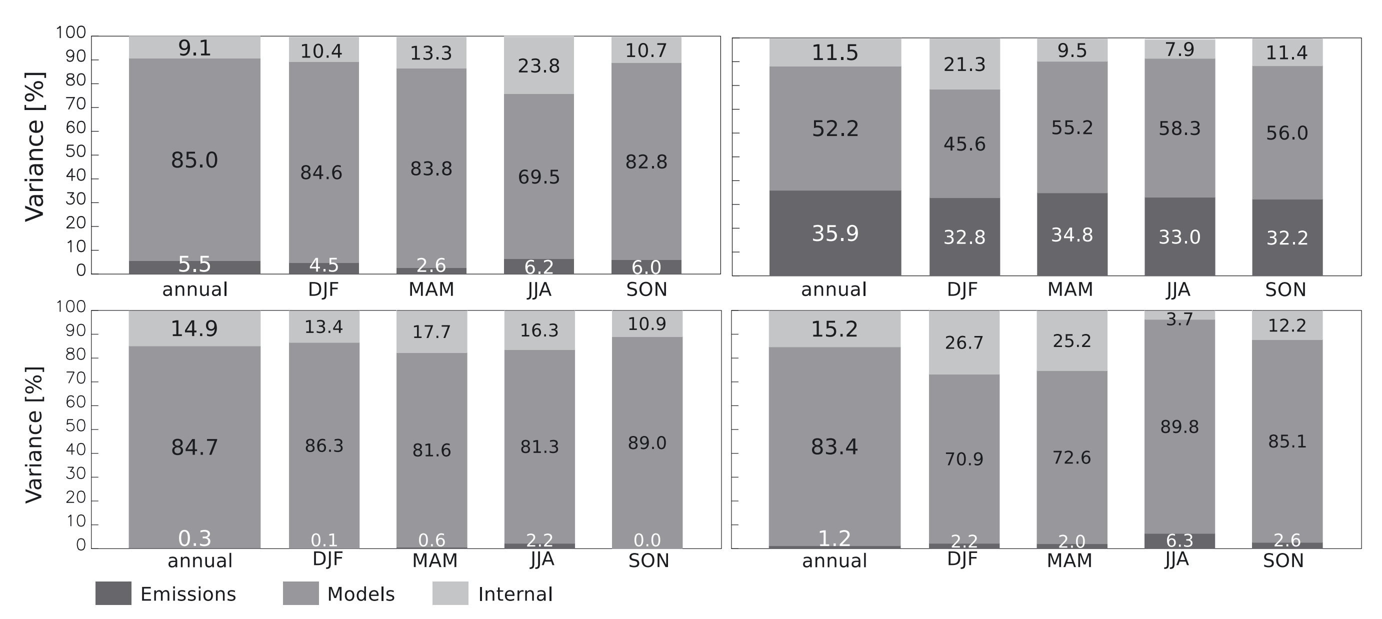


Abbildung 4.7 Der relative Beitrag unterschiedlicher Komponenten zur Unsicherheit in Temperatur- (oben) und Niederschlagsprojektionen (unten) über Europa im 30-jährigen Jahresmittel (annual), Winter (DJF), Frühling (MAM), Sommer (JJA) und Herbst (SON). Links: 2021–2050; Rechts: 2071–2100. Adaptiert nach Prein et al. (2011)

Figure 4.7 Relative contribution of different components to the uncertainty in temperature (up) and precipitation projections (down) for Europe in a 30 year mean, annual, winter (DJF), spring (MAM), summer (JJA), fall (SON). Left 2021–2050, right 2071–2100. Adapted after Prein et al. (2011)

den Emissionsszenarien A2, A1B und B1. Es ist deutlich zu sehen, dass die Modellunsicherheit dominiert und dass der Einfluss der Emissionsszenarien erst gegen Ende des Jahrhunderts (rechts) bei Temperaturprojektionen (obere Reihe) stark zu tragen kommt. Der Einfluss der natürlichen Variabilität beträgt zwischen etwa 10 und 25 %. Hierbei ist zu beachten, dass sich diese Werte auf 30-jährige Mittelwerte beziehen. Bei der Betrachtung kürzerer Perioden nimmt die natürliche Variabilität einen größeren Stellenwert ein.

Déqué et al. (2007, 2012) untersuchten die Bandbreite regionaler Klimamodelle im Vergleich zu globalen Klimamodellen über Europa und zeigten, dass in den meisten Fällen die Bandbreite der globalen Modelle überwiegt, außer im Sommer für Niederschlag. Der Anteil der Regionalmodelle beträgt etwa 40 % (mit Variationen je nach Region, Saison und Parameter).

Eine direkte Schlussfolgerung der Ergebnisse zur Unsicherheitsbandbreite ist, dass es für die mittel- und langfristige Klimafolgenforschung (Zeithorizont bis 2050) wichtig ist, mit den Ergebnissen möglichst vieler unterschiedlicher Klimamodelle zu arbeiten, um die Bandbreite der erwarteten Klimaänderung nicht zu unterschätzen. Um Nutzern von regionalen Klimasimulationen im Alpenraum eine Einschätzung zu erlauben, wo in dieser Bandbreite die von ihnen verwendeten Simulationen angesiedelt sind, sind die Klimaänderungssignale für Temperatur und Niederschlag der in den letzten Jahren verfügbaren Klimasimulationen in Abbildung 4.8 vergleichend dargestellt.

Speziell die systematischen Limitierungen bei den Klimamodellen verhindern, dass die Modellergebnisse direkt für die Weiterverwendung in den Modellen der Klimafolgenforschung verwendet werden können. Wie man dennoch deren

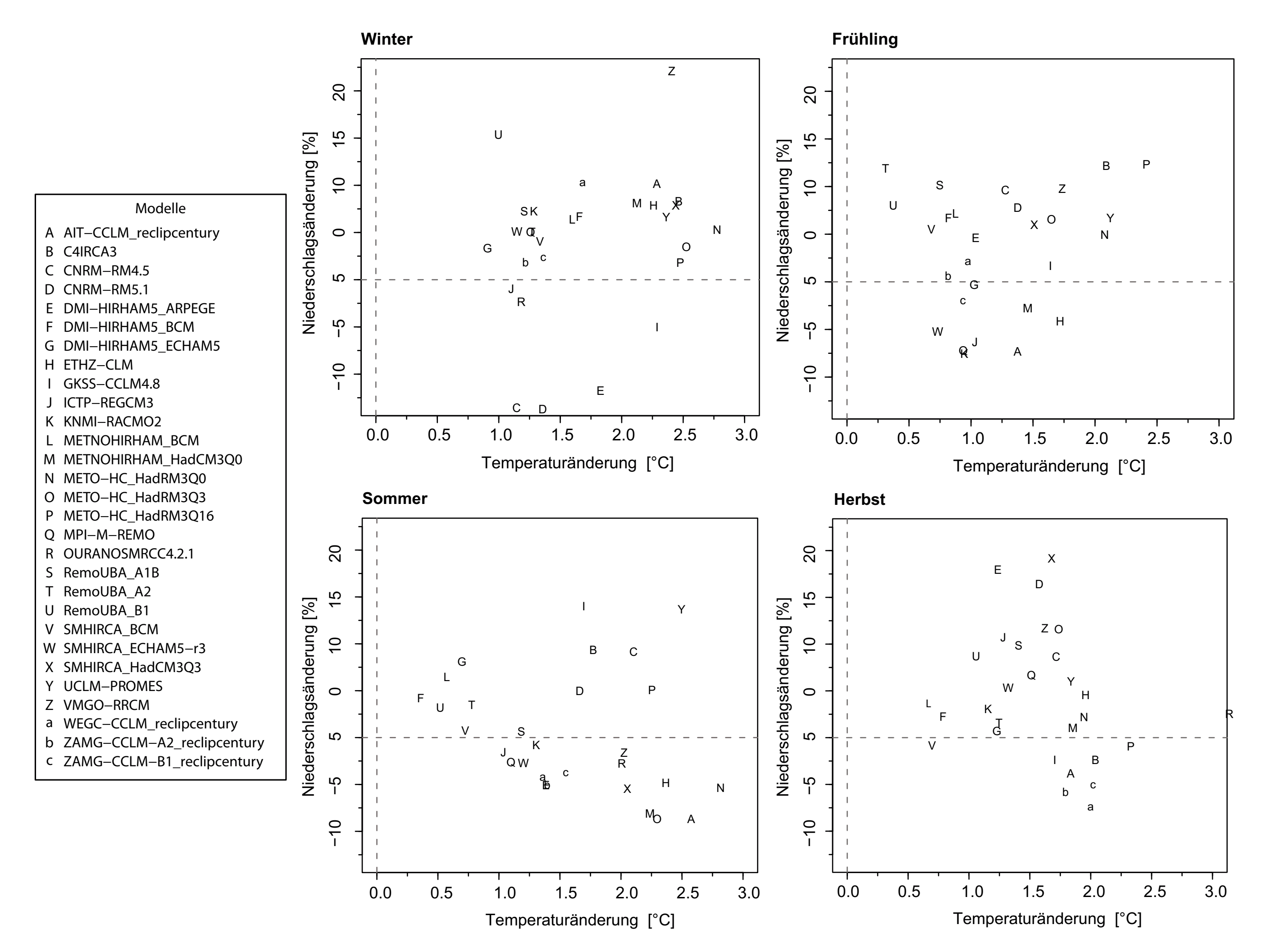


Abbildung 4.8 Temperatur [°C] und Niederschlags [%] Klimaänderungssignal (2021–2050 verglichen mit 1971–2000) der meisten verfügbaren regionalen Klimasimulationen für den Alpenraum. Grundlage: ENSEMBLES, reclip:century, REMO-UBA

Figure 4.8 Climate change signal (2021–2050 versus 1971–2000) for temperature [°C] and precipitation [%] for most available regional climate simulations within the Alpine region. Based on ENSEMBLES, reclip:century, REMO-UBA

Informationen für die Klimafolgenforschung zugänglich machen kann wird in Abschnitt 4.4 diskutiert.

4.3 Regionale Klimaprojektionen mit Bezug zu Österreich
4.3 Regional climate projections with respect to Austria

4.3.1 Einleitung

In den letzten Jahren haben sich sowohl das Verständnis regionaler Klimaprozesse als auch ihre Modellierung sehr verbessert. Auf der europäischen Skala zeigen die Ergebnisse globaler (GCM, vgl. Abschnitt 4.1) und regionaler Klimamodelle (RCM), dass in den nächsten Jahrzehnten mit weiterer Erwärmung, Niederschlagszunahme im Norden und Niederschlagsabnahme im Süden zu rechnen ist (vgl. Abschnitt 4.3.2). Für kleinere Gebiete mit besonderen regionalen Klimaeigenschaften, wie zum Beispiel den Alpenraum mit seiner komplexen Orografie, sind GCM aufgrund ihrer groben horizontalen Auflösung von einigen hundert Kilometern nur bedingt aussagekräftig (vgl. Abschnitt 4.1).

Um räumlich detaillierte Aussagen über die Zukunft unseres Klimas machen zu können, kommen daher vornehmlich RCM zum Einsatz. Erste Abschätzungen im Rahmen einer konsistenten Ableitung von Klimaänderungsszenarien auf Ökosysteme in Österreich gehen auf die späten 1990er Jahre zurück. Ein Beispiel für derartige Aktivitäten in Österreich ist die Generierung von Klimaänderungsszenarien an rund 11 000 Waldinventurpunkten quer über Österreich aus transienten Klimamodellläufen. Diese Szenarien wurden verwendet, um ein waldökologisches Wachstumsmodell anzutreiben (siehe Lexer et al., 2000; Lexer et al., 2001; Matulla et al., 2002). Damit wurden potentielle Veränderungen in der Zusammensetzung der Artenvielfalt des österreichischen Waldes beschrieben. In weiterer Folge wurde eine Reihe von Klimaänderungsszenarien (für Temperatur sowie Niederschlag mit monatlicher und täglicher Auflösung) an rund 30 Stationen entwickelt (an den sogenannten ALOCLIM-Stationen – Auer et al., 2001; Auer et al., 2007; Matulla und Haas, 2003; Matulla, 2005).

Es gibt zahlreiche Modellsimulationen für Vergangenheit und Zukunft, die den Alpenraum bzw. Österreich abdecken. Dabei reichen die räumlichen Auflösungen der Ergebnisse langer Simulationen von 50 km bis hin zu 10 km. Die zurzeit für Österreich wichtigsten und aktuellsten Klimarechnungen sind im Rahmen des national geförderten Projektes reclip:century, des EU Projekts ENSEMBLES und des COrdinated Regional climate Downscaling Experiment (CORDEX), einer Initiative des World Climate Research Programme (WCRP), entstanden. In reclip:century wurde ein Ensemble aus transienten Klimasimulationen für den größeren Alpenraum bzw. für Österreich mit 10 km x 10 km Rasterweite in stündlicher Auflösung erstellt. Für die Simulationen wurden die regionalen Klimamodelle MM5 und COSMO-CLM verwendet, die auf Daten zweier globaler Klimamodelle (ECHAM5, HADCM3) basieren, denen drei IPCC Treibhausgasanstiegsszenarien (A1B, B1, A2) zugrunde liegen. Dadurch konnte trotz limitierter finanzieller Ressourcen eine gewisse Bandbreite der möglichen Entwicklungen abgedeckt werden. Ausgewählte Temperatur- und Niederschlagsdatensätze sowie weitere ausgewählte Indikatoren werden der Öffentlichkeit über ein Web-Interface mit Funktionen für Datensuche und Download bereitgestellt[2].

Die CORDEX Initiative hat zum Ziel, hochaufgelöste Klimaänderungsinformationen für alle Kontinente bereitzustellen. Im Rahmen des von Österreich (Uni Graz, Wegener Center) und Deutschland (Climate Service Center Hamburg) ko-koordinierten Europäischen Zweigs (EURO-CORDEX) dieser Initiative werden mehr als 30 Klimaprojektionen für Gesamteuropa mit einer räumlichen Auflösung von 12,5 km unter Nutzung von 10 regionalen Klimamodellen in Kombination mit 8 globalen Klimamodellen und drei unterschiedlichen zukünftigen Emissionsszenarien (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5) erstellt.

Neben diesen hoch aufgelösten Simulationen, welche insbesondere für den orographisch komplexen Alpenraum von großer Bedeutung sind, wird auch ein sehr großes Ensemble (mehr als 60 Simulationen) in einer Auflösung von 50 km erzeugt, welches insbesondere für die Einschätzung von Unsicherheiten eine wertvolle Datenbasis liefern wird. Erste Ergebnisse aus EURO-CORDEX wurden in Jacob et al. (2014) und Vautard et al. (2013) publiziert und werden im Laufe des Jahres 2014, ähnlich wie derzeit schon globale Klimasimulationen, über das „Earth System Grid Framework“ online frei verfügbar sein.

Weitere wichtige internationale Projekte waren PRUDENCE (Jacob et al., 2007) und ENSEMBLES (van der Linden und Mitchell, 2009).

Eine Übersicht dieser und weiterer wichtiger nationaler und internationaler Projekte, die regionale Klimasimulationen bereitstellen, welche Österreich abdecken und damit hier für Klimaanalysen zur Verfügung stehen, ist in Tabelle 4.1 zusammengestellt. Die Tabelle kann nur einen Ausschnitt der vielfältigen Projekte und verfügbaren Simulationen abbilden. Sobald

[2] http://reclip.ait.ac.at/reclip_century/

das Österreichische Klimadatenzentrum des CCCA eingerichtet ist, werden dort systematisch Informationen zu österreichrelevanten Klimaszenarien gesammelt, sowie Metadaten und, wenn möglich, die Szenariendaten selbst zugänglich gemacht.

Den Projekten ist gemeinsam, dass sie Klimaänderungssimulationen mit möglichst vielen regionalen Klimamodellen, genestet in möglichst unterschiedlichen Klimaprojektionen unter verschiedenen Treibhausgasemissionsszenarien durchführten. Dadurch basieren die entwickelten Klimaänderungsszenarien einem möglichst großen Ensemble von Einzelprojektionen. Ein Vorteil ist, dass Ausreißer gesondert diskutiert werden und gegebenenfalls in der Erstellung der Klimaänderungsszenarien ein geringeres Gewicht erhalten können. Vor allem lassen sich durch die Auswertung des Ensembles Spannweiten der Klimaänderung (z. B. einer Temperaturänderung zwischen einem kleinsten und einem größten Wert) angeben. Dies ist ein Maß für die Projektionsunsicherheit. Ist die anzugebene Spannweite sehr groß, dann deutet dies auch auf besondere Unsicherheiten in der Projektion der entsprechenden Klimaelemente hin (siehe auch Abschnitt 4.2.3).

In diesem Kapitel werden nur die direkten Ergebnisse von regionalen Klimamodellen, also meteorologische Kenngrößen wie Temperatur, Niederschlag und ähnliches, vorgestellt. Abgeleitete Größen wie Trockenstressindikatoren oder Aussagen zu Hochwasserrisiko werden in Band 2 behandelt, da für derartige Informationen meist eine weitere Interpretation bzw. eine modellhafte Bearbeitung unter Berücksichtigung der Bodenverhältnisse, der Topografie und anderen Faktoren notwendig ist. Auch der Schnee wird in Band 2, Kapitel 2 behandelt. Schnee wird zwar direkt in regionalen Klimamodellen berechnet, jedoch können die Schneeergebnisse nicht direkt lokal interpretiert werden. Dies liegt einerseits daran, dass selbst die derzeit höchst aufgelösten regionalen Klimamodelle mit 10 km Gitterdistanz die Alpinen Täler nicht richtig auflösen können, andererseits handelt es sich bei Schnee um eine akkumulierende Größe, sodass auch Modellfehler (z. B. Niederschlagsüberschätzung im Gebirge) akkumulieren und nicht durch einfache Fehlerkorrekturverfahren nachträglich verbessert werden können.

4.3.2 Klimaänderungsszenarien bis 2050 bzw. 2100

Klimaszenarien für Europa

Die folgenden Ergebnisse basieren auf der Auswertung von 21 regionalen Klimasimulationen des ENSEMBLES-Projekts, die auf dem SRES A1B-Emissionsszenario und 8 unterschiedlichen globalen Klimasimulationen beruhen. Die Einschränkung auf ein Emissionsszenario ist für die 2 Hälfte des 21 Jahrhunderts von Bedeutung, da die projizierten Klimaänderungen bis 2050 nur gering, bis 2100 aber deutlich unter Annahme verschiedener Treibhausgasszenarien variieren (vgl. Abschnitt 4.1.1). Die Verwendung von nur 8 globalen Simulationen stellt in Bezug auf die Einschätzung der Modellunsicherheiten keine Einschränkung dar (Heinrich et al., 2013).

Im Mittel müssen zwischen den Perioden 1961 bis 1990 und 2021 bis 2050 über Europa (inklusive umliegendem Ozean) Temperaturänderungen von +1,6 °C (0,27 °C / Jahrzehnt) im Winter und +1,5 °C (0,25 °C / Jahrzehnt) im Sommer erwartet werden (Heinrich und Gobiet, 2011). In beiden Saisonen treten regionale Unterschiede auf, mit einer sehr starken Erwärmung von über 2,2 °C im Winter in Nordost-Europa und im Sommer in Südeuropa. Tendenziell führt eine größere Kontinentalität zu einem verstärkten Erwärmungstrend.

Die Spannweite des Ensembles ist im Vergleich zum Multimodell-Mittelwert der Klimaänderung klein. Der Variationskoeffizient (die Standardabweichung der 21 simulierten Trends über dem mittleren Trend) ist in Regionen mit großen Temperaturänderungen über Land kleiner als 0,5 und alle Modelle zeigen eine Erwärmung an. Daher ist es unter Annahme des A1B-Emissionszenarios praktisch sicher, dass sich Europa im 21. Jahrhundert weiter erwärmen wird.

Die räumlichen Unterschiede der Temperaturänderung im Winter können zum Teil durch die geringere Erwärmung des Atlantiks und die damit einhergehende Beeinflussung des maritimen Klimas im Westen Europas in Kombination mit veränderten Schnee-Albedo-Rückkopplungs-Mechanismen in den nördlichen und östlichen Teilen Europas erklärt werden (Rowell, 2005). Plavcová und Kyselý (2013) zeigen, dass sich in den ENSEMBLES-Projektionen auch die Häufigkeit des Zirkulationsmusters Westwetterlage verschiebt. Die winterliche Westwetterlage, die relative warme atlantische Luftmassen nach Nordeuropa bringt, wird häufiger. Dagegen wird im Sommer die im Mittelmeerraum kühlende Westwetterlage seltener. Dieser Effekt ist aber von geringerer Wichtigkeit (Rauthe und Paeth, 2004; Stephenson et al., 2006; van Ulden et al., 2007). Die hohen Temperaturänderungen im Süden Europas können außerdem mit einer früheren und schnelleren Abnahme der Bodenfeuchte in Verbindung gebracht werden (Wetherald und Manabe, 1995; Gregory et al., 1997).

Die aus den ENSEMBLES-Simulationen erwarteten Niederschlagsänderungen bis 2050 weisen über Europa sehr starke regionale Unterschiede auf, wie etwa einen deutlichen Nord-Süd-Kontrast (Heinrich und Gobiet, 2011). Es muss mit einer Abnahme in den südlichen Teilen (insbesondere im

Sommer) und einer Zunahme in den nördlichen Teilen Europas (insbesondere im Winter) gerechnet werden. Dies ist wiederum konsistent mit den globalen Projektionsergebnissen (vgl. Abschnitt 4.1.2). Die Unterschiede zwischen den Modellsimulationen sind zwar deutlich größer als bei Temperatur (Variationskoeffizient meist deutlich größer als 1), im Norden und Süden Europas aber im Vergleich zum Multimodell-Mittelwert immer noch relativ klein, daher kann auch dieses Muster als wahrscheinlich angesehen werden (van der Linden und Mitchell, 2009). Diese Aussage wird auch durch das Vorgängerprojekt PRUDENCE gestützt, dessen Ergebnisse qualitativ gut mit den ENSEMBLES-Ergebnissen übereinstimmen (Christensen und Christensen, 2007).

Der stark ausgeprägte Nord-Süd-Kontrast der Niederschlagsänderung kann auf Veränderungen in der Zirkulation und auf thermodynamische Faktoren zurückgeführt werden (Christensen et al., 2007; Kendon, 2009). Die winterliche Niederschlagszunahme im Norden Europas wird von einem, mit der Erwärmung einhergehenden, Anstieg an atmosphärischem Wassergehalt mitbestimmt, wohingegen bei der Niederschlagsabnahme im Süden im Sommer eine Rückkopplung mit abnehmender Bodenfeuchte eine Rolle spielt (Kendon, 2009). Die Verschiebung der Übergangszone Richtung Norden im Winter und Richtung Süden im Sommer wurde als „European Climate Change Oscillation" bezeichnet und hängt mit einer saisonalen Verschiebung der Zugbahnen nordatlantischer Tiefdruckgebiete zusammen (Giorgi und Coppola, 2007).

Die geografische Lage der Übergangszone von trockeneren Bedingungen im Süden zu feuchteren im Norden ist jedoch mit sehr großen Unsicherheiten behaftet. Insbesondere für den Alpenraum und Österreich sind Niederschlagsprojektionen sehr unsicher und die Bandbreite der Möglichkeiten sehr groß.

Klimaszenarien für Österreich und den Alpenraum

Ein Ensemble von regionalen Klimaprojektionen mit speziellem Fokus auf den Alpenraum wurden in Heinrich und Gobiet (2011), Heinrich et al. (2012) und Gobiet et al. (2013) analysiert. Berücksichtigt wurden sämtliche Simulationen aus ENSEMBLES und teilweise drei zusätzliche Simulationen, die mit einer hohen horizontalen Auflösung von 10 km speziell für den Alpenraum im österreichischen Projekt reclip:century (Loibl et al., 2011a) gerechnet wurden. Alle analysierten Simulationen basieren auf dem A1B-Emissionsszenario. Während dies bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts nur eine kleine Einschränkung ist, muss für das Ende des 21. Jahrhunderts beachtet werden, dass die hier gezeigten Änderungen unter Annahme des A1B-Szenarios nur einen von vielen möglichen Entwicklungspfaden der Menschheit repräsentieren. Andere gebräuchliche Szenarien führen zu schwächeren (Szenario B1) beziehungsweise stärkeren (Szenario A2) Änderungen (siehe auch Abschnitt 4.1.2). Eine Diskussion der zugrunde liegenden Prozesse für die Änderungen findet in Abschnitt 4.1 sowie im Abschnitt „Klimaszenarien für Europa" statt.

Da viele der regionalen Simulationen nur mit zwei verschiedenen globalen Klimamodellen angetrieben wurden (ECHAM5 und HadCM3), sind einfache Multimodell-Statistiken möglicherweise verzerrt. Um eine von derartigen systematischen Fehlern bereinigte Abschätzung zu erlangen, wurden auf regionaler Basis die fehlenden Temperatur- und Niederschlagsänderungen der ENSEMBLES Simulationsmatrix nach Déqué (2007) rekonstruiert und die Ergebnisse für den gesamten Alpenraum sowie für vier Subregionen („HISTALP Regionen") im Detail untersucht. Eine feinere räumliche Differenzierung der Ergebnisse sollte nicht erfolgen. Die einzelnen Gitterpunktwerte der Regionalmodelle können nicht interpretiert werden, da die effektive Auflösung der Modelle deutlich schlechter ist als die Gitterauflösung (mindestens um einen Faktor 4).

In Abbildung 4.9 sind die mittleren erwarteten Veränderungen der Temperatur, des Niederschlags, der Globalstrahlung, der relativen Luftfeuchte und der Windgeschwindigkeit für den Alpenraum im Vergleich zur Referenzperiode 1961 bis 1990 für den Zeitraum 2021 bis 2050 sowie 2069 bis 2098 für Sommer und Winter dargestellt. Die Temperaturänderung zeigt somit in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts eine mittlere Erwärmung des Alpenraumes von 1,6 °C (0,27 °C / Jahrzehnt) im Winter und 1,7 °C (0,28 °C / Jahrzehnt) im Sommer. Damit liegt der Alpenraum im Winter nahe dem Europa-Mittel der Erwärmung und im Sommer leicht darüber. Abbildung 4.10 weist zusätzlich auf eine überdurchschnittliche Erwärmung entlang des Alpenhauptkammes hin. Mehr Details zur Höhenabhängigkeit des Klimaänderungssignals in den Alpen sind in Kotlarksi et al. (2012) und Gobiet et al. (2013) zu finden. Die Unterschiede zwischen den Modellen sind im Vergleich zum Multimodell-Mittelwert klein (Variationskoeffizient meist kleiner als 0,5) und alle Modelle zeigen eine Erwärmung an. Daher ist es praktisch sicher, dass sich unter Annahme des A1B-Emissionsszenarios der Alpenraum im 21. Jahrhundert weiter erwärmen wird. In Abbildung 4.10 ist der Jahresgang der Änderung für die Perioden 2021 bis 2050 und 2069 bis 2098 dargestellt. Die mittlere Erwärmung ist im Winter und Spätsommer etwas stärker als in den restlichen Jahreszeiten, allerdings sind diese Unterschiede klein gegenüber der Bandbreite, die durch die unterschiedlichen Simulationen aufgespannt wird. So gut wie sicher ist allerdings unter

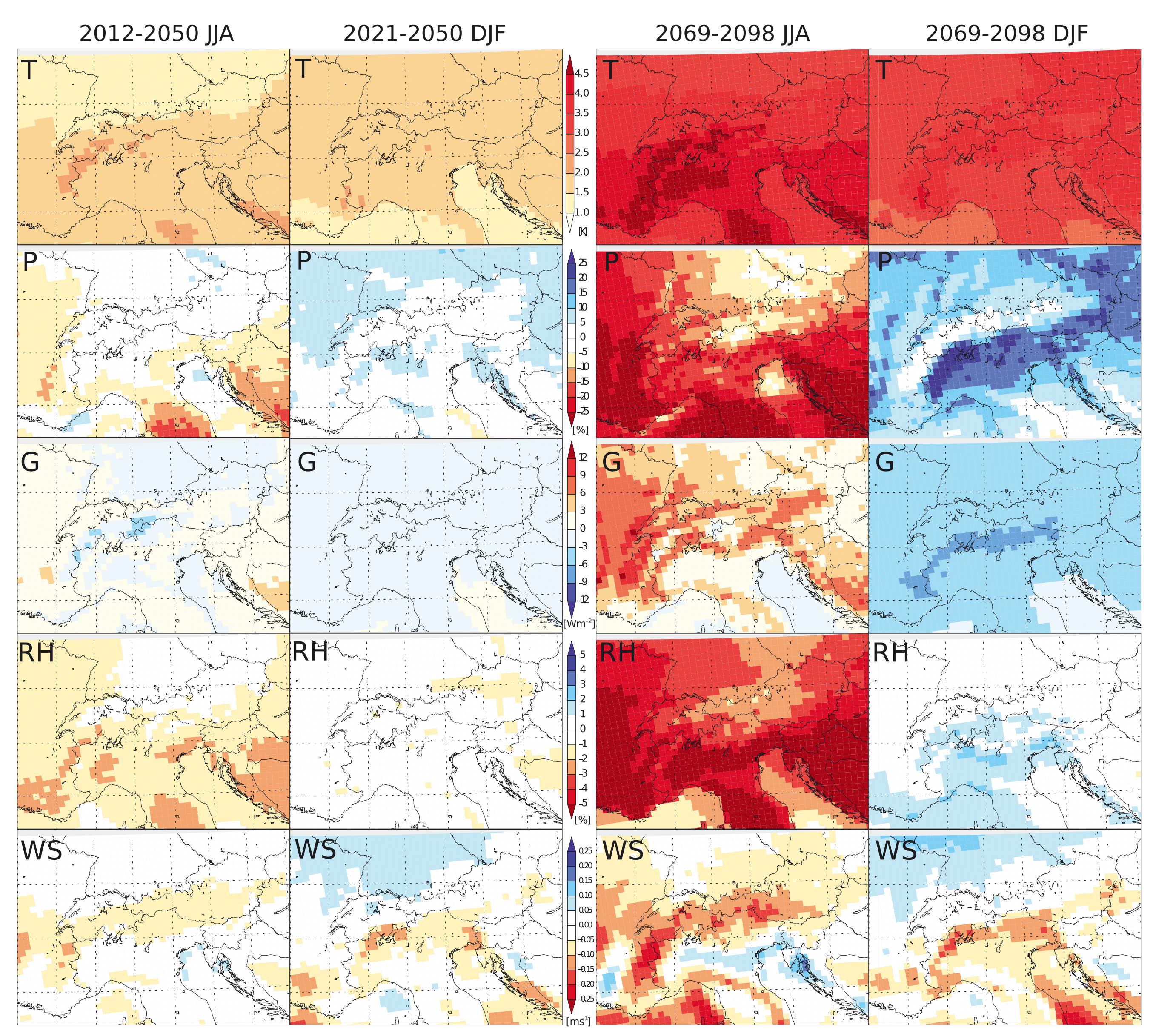


Abbildung 4.9 Räumliche Verteilung des erwarteten Klimawandels im Sommer (JJA) und Winter (DJF) in den Alpen: Temperatur (T), Niederschlag (P), Globalstrahlung (G), relative Feuchte (RH) und Windgeschwindigkeit (WS) im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990. Links: 2021–2050, rechts: 2069–2098. Quelle: Gobiet et al. (2014)

Figure 4.9 Spatial pattern of expected climate change in the Alpine region for temperature (T), precipitation (P), global radiation (G), relative humidity (RH), and wind speed (WS) relative to the reference period 1961–1990 in summer (JJA) and winter (DJF). Left columns: 2021–2050, right columns: 2069–2098. Source: Gobiet et al. (2014)

dem A1B-Emissionsszenario eine Erwärmung um etwa 3,5 °C bis zum Ende des 21. Jahrhunderts.

Die Niederschlagsänderung bis Mitte des 21. Jahrhunderts weist eine mittlere Zunahme von 3,7 % im Winter und eine Abnahme von 3,1 % im Sommer auf. Der Multimodell-Mittelwert deutet auf den Einfluss des Alpenhauptkammes auf die räumliche Verteilung der Klimaänderung hin. Dabei wird eine Tendenz zur Niederschlagszunahme nördlich der Alpen im Frühling, Sommer und Herbst projiziert, während die südlichen und westlichen Teile des Alpenraums Abnahmen aufweisen. Die mit dieser Nord-Süd-Trennung der Niederschlagsänderung verbundenen Unsicherheiten sind jedoch sehr groß. In Abbildung 4.10 ist der Jahresgang der Änderung für die Perioden 2021 bis 2050 und 2069 bis 2098 dargestellt. Obwohl schon zu Mitte des 21 Jahrhunderts (links) die bereits beschriebene Tendenz zu mehr Niederschlag im Winter und weniger Niederschlag im Sommer im Median zu erkennen ist, zeigen die Modelle in dieser Periode keinerlei Einigkeit über die Richtung der Änderung und die Unsicherheiten sind sehr groß. Zu Ende des 21. Jahr-

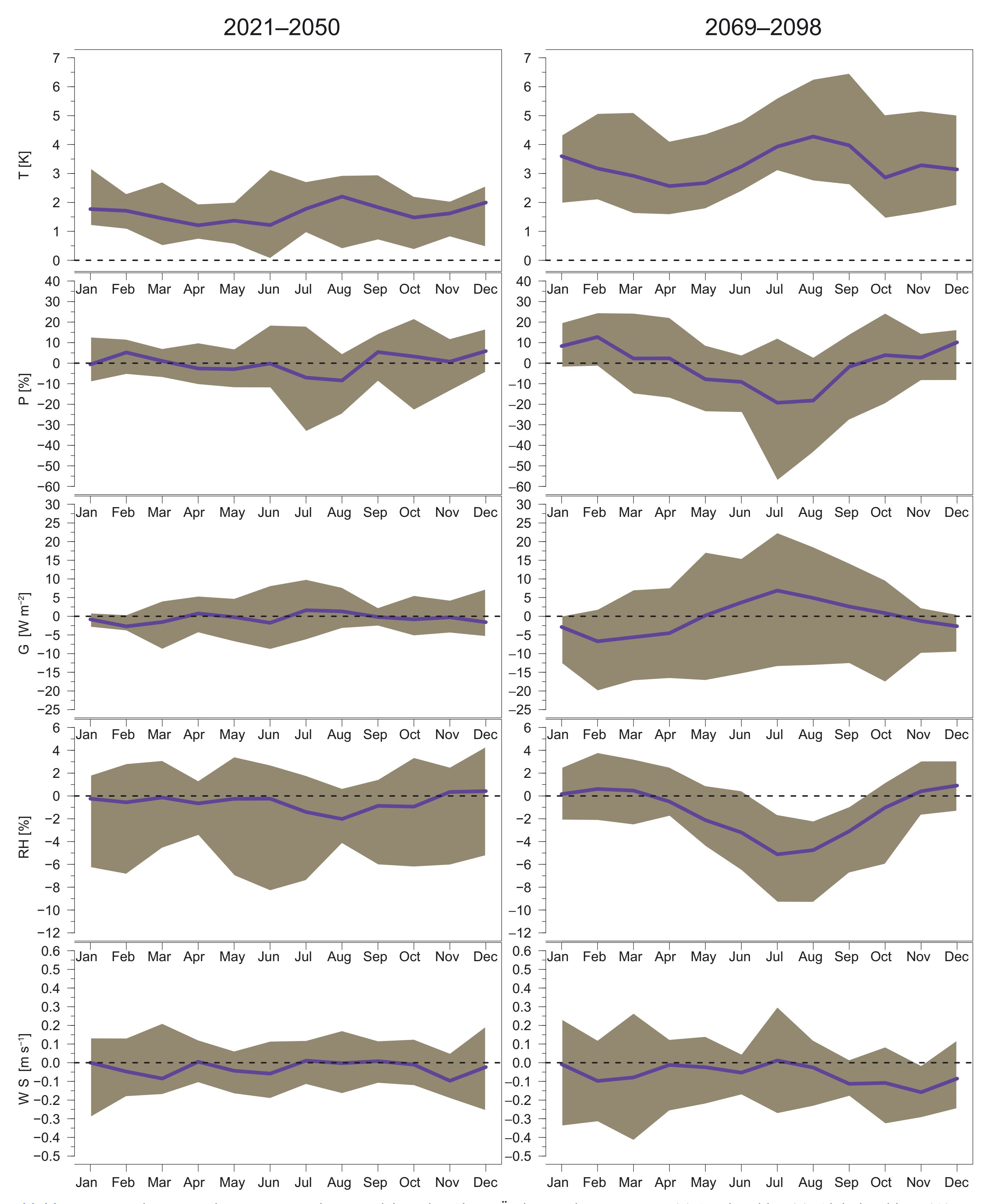


Abbildung 4.10 Jahresgang des erwarteten Klimawandels in den Alpen: Änderung der Temperatur (T), Niederschlag (P), Globalstrahlung (G), Relative Feuchte (RH) und Windgeschwindigkeit (WS) im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990. Links: 2021–2050, rechts: 2069–2098. Die blaue Linie zeigt den Median und die graue Schattierung den 10.–90. Percentilebereich des Multi-Modell-Ensembles. Quelle: Gobiet et al. (2014)

Figure 4.10 Annual cycle of expected monthly mean change in the Alpine region of temperature (T), precipitation (P), global radiation (G), relative humidity (RH), and wind speed (WS) relative to the reference period 1961–1990. Left column: 2021–2050, right column: 2069–2098. The blue line indicates the median, the grey area the 10–90 percentile range of the multi model ensemble. Source: Gobiet et al. (2014)

hunderts (rechts), zeigt sich aber unter dem A1B-Szenario eine sehr deutliche Tendenz zu trockeneren Verhältnissen im Sommer (etwa –20 %) und feuchteren Verhältnissen im Winter (etwa +10 %).

Die Temperaturänderungen der auf regionaler Basis berechneten ENSEMBLES-Simulationsmatrix für die vier HISTALP-Regionen ergeben eine Temperaturänderung im Median von +1,9 °C, +1,8 °C, +1,8 °C und +1,8 °C für die Regionen Nordost, Nordwest, Südost und Südwest im Winter, und +1,7 °C, +1,6 °C, +2,0 °C und +1,9 °C im Sommer. Der kleinste (größte) Unsicherheitsbereich, definiert als Differenz zwischen 90. und 10. Perzentil, beträgt 1,2 °C für die Südwest-Region (1,4 °C für die Nordost-Region) im Winter und 1,5 °C für die Nordwest-Region (1,9 °C für die Südwest-Region) im Sommer. Die Niederschlagsänderung im Median beträgt +3,9 %, +2,7 %, +4,7 %, und +3,7 % für die vier oben genannten Regionen im Winter, und +1,8 %, –0,4 %, –3,1 % und –2,1 % im Sommer. Der kleinste (größte) Unsicherheitsbereich, beträgt 13,8 % für die Südwest-Region (21,4 % für die Nordwest-Region) im Winter und 21,8 % für die Nordwest-Region (30,2 % für die Südwest-Region) im Sommer. Zusammenfassend zeigen die Bandbreiten der Klimaänderung (jener Bereich in dem 80 % der Simulationen liegen), dass unter dem A1B-Szenario bis zur Mitte des Jahrhunderts eine weitere Erwärmung in jeder Saison und auch in Teilregionen des Alpenraums so gut wie sicher ist, aber künftige Niederschläge sowohl zu- als auch abnehmen können.

Abbildung 4.10 zeigt die Änderung der Globalstrahlung (kurzwellige Sonnen- und Himmelsstrahlung). Ähnlich wie beim Niederschlag ergibt sich bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts nur eine sehr leichte Veränderung im Jahresgang, zu Ende des Jahrhunderts allerdings schon eine deutliche Zunahme im Sommer und Abnahme im Winter. Dies ist konsistent mit den Niederschlagsprojektionen, da niederschlagsproduzierende Wolken die Sonneneinstrahlung abschirmen. Die Relative Feuchte zeigt in den Projektionen eine deutliche Abnahme um ca. 5 % bis zum Ende des Jahrhunderts.

Vergleichbare Studien mit regionalen Klimamodellen lieferten ähnliche Ergebnisse. Zum Beispiel verwendeten Buser et al. (2010) ein bayesianisches Verfahren, basierend auf sieben RCM-Simulationen aus ENSEMBLES, um eine probabilistische Abschätzung der zukünftigen Temperaturentwicklung für acht europäische Subregionen zu erlangen. Die berechnete Temperaturänderung für den Alpenraum beträgt im Median +1,2 °C, +1,6 °C, +1,5 °C und +1,6 °C für Frühling, Sommer, Herbst und Winter zwischen den beiden Perioden 1961 bis 1990 und 2021 bis 2050.

Weitere regionale Abschätzungen der Temperatur- und Niederschlagsänderungen für den Alpenraum bis zum Ende des 21. Jahrhunderts, können Christensen und Christensen (2007) für die Ergebnisse aus PRUDENCE entnommen werden. Die geschätzten Temperaturänderungen (Niederschlagsänderungen) unter dem A2-Emissionsszenario betragen im Multimodell-Mittelwert +3,3 °C (0 %), +5,0 °C (–26 %), +4,2 °C (–7 %) und +3,5 °C (+20 %) für Frühling, Sommer, Herbst und Winter zwischen den beiden Perioden 1961 bis 1990 und 2071 bis 2100. Der Unsicherheitsbereich der Temperaturänderung (Niederschlagsänderung) reicht dabei, mit einem Signifikanzniveau von 99 %, von +2,7 °C bis +4,3 °C (+0,01 mm / Tag bis +0,69 mm / Tag) im Winter und von +3,9 °C bis +6,7 °C (–0,27 mm / Tag bis –1,21 mm / Tag) im Sommer (Déqué et al., 2007).

Strauss et al. (2013) schätzen mittels eines statistischen Extrapolationsverfahrens die Temperaturerhöhung in Österreich auf Basis von Beobachtungsdaten für die nächsten 33 Jahre auf 1,6 °C. Dieser Wert liegt mit 0,48 °C / Jahrzehnt deutlich über den Abschätzungen auf Basis von regionalen Klimamodellen (etwa 0,25 bis 0,3 °C / Jahrzehnt), was auf den beobachteten sehr starken Temperaturtrend der letzten Jahrzehnte zurückzuführen ist. Ob dieser Trend, durch natürliche Variabilität beeinflusst, zu einer Überschätzung des künftigen Klimawandels geführt hat, oder ob regionale Klimamodelle den zukünftigen Trend systematisch unterschätzen ist derzeit nicht geklärt.

Extremereignisse

Meteorologische Extremereignisse sind in der Klimaforschung von großem Interesse, da diese eine signifikante Auswirkung auf die Natur, die Infrastruktur und das menschliche Leben haben können. Ob und inwieweit sich die Häufigkeit oder Intensität von seltenen bzw. exzessiven Ereignissen im Klimawandel verändert, ist daher auf der gesamten Welt Gegenstand laufender Untersuchungen. Die noch vorhandenen Unsicherheiten in den Zukunftserwartungen extremer Ereignisse gehen nicht nur auf die noch zu geringe räumliche und zeitliche Auflösung der Klimamodelle zurück, sondern liegen auch in der hohen Nichtlinearität dieser Phänomene begründet. Eine umfassende Diskussion zu meteorologischen Extremereignissen findet sich in Band 2, Kapitel 3.

Szenarien für Extremereignisse

Temperatur

Klimaänderungsprojektionen der Temperatur gelten in der Klimawissenschaft als die am besten abgesicherten. Dennoch bleiben auch hier noch wichtige Aspekte offen oder unzureichend berücksichtigt, vor allem, wenn es um atmosphärische Persistenzen, die natürliche Variabilität des Klimas oder um mögliche Rückkoppelungseffekte, wie z. B. jene aus der Schneebedeckung, Wolkenbedeckung oder Bodenfeuchte, geht.

In einer frühen Untersuchung wurden für Österreich moderate Extreme der Temperatur mittels statistischen Downscaling-Verfahren aus Monatsfeldern globaler Klimamodellsimulationen untersucht (Formayer et al., 2003). Im Vergleich der relativen Häufigkeit von Tropentagen (T_{max} ≥ 30 °C) und Sommertagen (T_{max} ≥ 25 °C) für unterschiedliche Zeitperioden für Wien zeigt sich ein Anstieg in der Häufigkeit von Tropentagen von 10 % auf 24 % sowie von 40 % auf 69 % im Fall der Sommertage (2020 bis 2049 verglichen mit 1961 bis 1990). Bei einer anderen Untersuchung für Wien und Graz zur nächtlichen Abkühlung wurden mittels Analogverfahren tägliche Maxima und Minima der Temperatur aus globalen Klimamodellsimulationen abgeleitet (Gerersdorfer et al., 2006). Im Vergleich zur Periode 1961 bis 1990 erhöht sich demnach die Anzahl der „warmen Nächte" von 3,6 auf 22,9 in Graz sowie von 9,9 auf 33,6 in Wien an der Station Hohe Warte im Szenario für 2019 bis 2048. Als warme Nacht wird in dieser Arbeit eine Nacht mit Minimum nicht unter 18 °C bezeichnet wenn diese auf ein Tagesmaximum von ≥ 30 °C folgt.

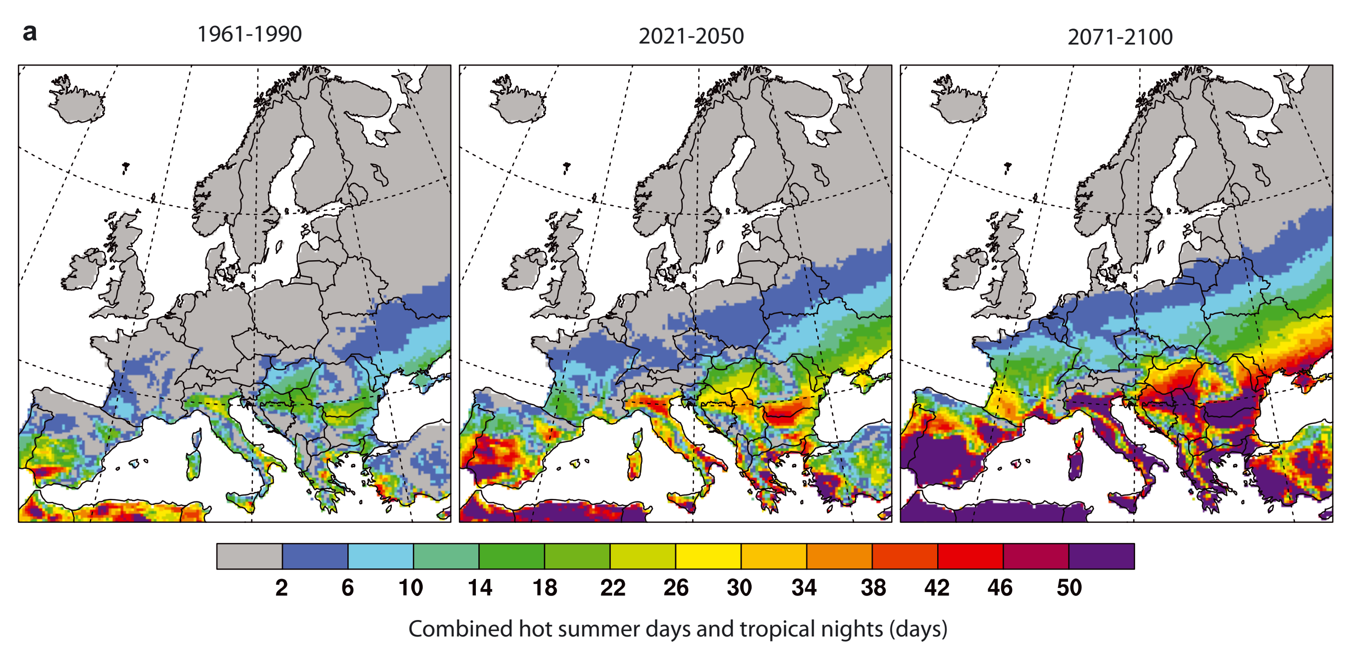
Die Veränderung von verschiedenen Indizes für tägliche Temperaturextremwerte in der Klimazukunft wurde im Projekt PRUDENCE u.a. auch für den Alpenraum untersucht (Kjellström et al., 2007). Dabei wurde jeweils das Klimaszenario A2 (minus CTRL) aus zehn regionalen Klimamodellen für die Periode 2071 bis 2100 mit der Periode 1961 bis 1990 verglichen. Je nach Modell nimmt in Österreich die Temperatur für das 95. Perzentil von T_{max} (JJA) um 4 bis 9 °C, sowie für das 5. Perzentil von T_{min} (DJF) um 5 bis 8 °C zu. Die räumlichen Unterschiede über Europa und zum Teil auch über Österreich variieren zwischen den Modellen. Vor allem aber auch das Klimasignal selbst unterscheidet sich erheblich zwischen den Modellen obwohl alle Regionalmodelle mit dem gleichen Globalmodell HadAM3H bzw. HadCM3 im Emissionsszenario A2 angetrieben wurden. Die Autoren zeigen zudem, dass der jeweilige Modellfehler zu den Randwerten der Verteilung von T_{max} und T_{min} hin systematisch größer ist.

Eine andere Untersuchung (Nikulin et al., 2011) bestätigt im Übrigen die stärkere Erhöhung der kältesten Temperaturminima (+6 °C) im Vergleich mit jener der wärmsten Temperaturmaxima (+4 °C) im A1B-Szenario. Hierfür wurde ein regionales Klimamodell (RCA3) mit sechs verschiedenen globalen Klimamodellen angetrieben und die Simulationen verglichen.

Fischer und Schär (2010) analysierten die Ergebnisse aus einer Multimodel-Simulation mit regionalen Klimamodellen aus dem ENSEMBLES-Projekt hinsichtlich der Veränderung von Hitzewellen und Temperaturextremen. Dabei zeigte sich eine Erhöhung der Temperatur beim Auftreten von Hitzeperioden im Sommer der Klimazukunft von +4 °C in Österreich (Periode 2071 bis 2100). Die Häufigkeit im Auftreten von Hitzewellen (HWF90: Überschreitung des 90. Perzentils für T_{max} an 6 aufeinander folgenden Tagen) wird dabei von 5 auf 15 / Jahr bis zum Ende des Jahrhunderts ansteigen.

In Abbildung 4.11 ist die Veränderung der sommerlichen (JJA) Hitzebelastung dargestellt. Dieser Index ist ein kombiniertes Maß aus heißen Tagen und darauf folgenden tropischen Nächten. Besonders in Südostösterreich wird eine starke Zunahme auf bis zu 30 solcher Tage simuliert (zum Vergleich 7 Tage während der Periode 1961 bis 1990).

Für Oberösterreich wurde von Kromp-Kolb et al. (2009) eine Untersuchung über die zukünftig zu erwartende Hitzebelastung durchgeführt. Dabei wurden sowohl „heiße Tage" als auch Hitze-Episoden nach Kyselý (mindestens 3 aufeinander folgende Tage mit T_{max} ≥ 30 °C; Kysely, 2004) aus Temperaturfeldern des globalen Klimamodells ECHAM5 statistisch abgeleitet. So nimmt beispielsweise an der Station Linz / Hörsching die mittlere Anzahl der Tropentage von 9,6 (1976 bis 2005) auf 16,3 (2010 bis 2039) zu. Bis zum Ende dieses Jahrhunderts soll sich die Anzahl der Tropentage im Szenario A1B hier sogar verdreifacht haben. Waren Kysely-Episoden im aktuellen Klima noch mit 8 Ereignissen pro Jahr zu beobachten, steigt die Häufigkeit gegen Mitte dieses Jahrhunderts je nach Emissionsszenario bereits auf 13 bis 21 Episoden an. Zu ganz ähnlichen Aussagen gelangt auch eine andere Untersuchung, die für die Stadt Wien durchgeführt wurde (Formayer et al., 2007). Dabei wurde im Gegensatz zur ersten Untersuchung für Oberösterreich direkt mit regionalen Klimasimulationen des Regionalmodells REMO in Verbindung mit einer Bias-Korrektur gearbeitet. In dieser Arbeit wurden verschiedene temperatursensitive Indikatoren für verschiedene Standorte innerhalb Wiens berechnet – eine Auswahl ist in Abbildung 4.12 zusammengestellt. Neben der markanten Veränderung der Indikatoren speziell nach der zweiten Hälfte des Jahrhunderts, werden auch die Auswirkungen des Stadteffekts veranschaulicht. An den zwei heißesten Wiener Stationen er-



Abdruck mit freundlicher Genehmigung von Macmillan Publishers Ltd.: Nature Geoscience 3, S. 398–403, Abb.3a, © 2010

Abbildung 4.11 Veränderung des Hitzestresses in Europa (Kombination aus Hitzetagen und tropischen Nächten; Anzahl an Tagen). Mittelwert aus Multimodel-Simulationen regionaler Klimamodelle (ENSEMBLES-Projekt) 2071–2100 verglichen mit 1961–1990. Quelle: Fischer und Schär (2010)

Figure 4.11 Change in heat stress in Europe (combination of hot summer days and tropical nights; number of days). Average of multi-model simulations from regional climate models (ENSEMBLES-project). 2071–2100 versus 1961–1990. Source: Fischer and Schär (2010)

gibt sich in dieser Studie ein Anstieg der Hitzetage von derzeit rund 15 Ereignissen im Mittel auf etwa 30 bis zur Mitte des Jahrhunderts, bis zum Ende des Jahrhunderts liegen die Werte zwischen 45 und 50 Ereignissen. Gleichzeitig nehmen kalte Nächte mit Frost in der Innenstadt von derzeit rund 50 Ereignissen auf unter 40 zur Mitte des Jahrhunderts und knapp über 20 am Ende des Jahrhunderts ab.

Dürre

Calanca (2007) analysierte die Eintrittswahrscheinlichkeit und Intensität von Dürreepisoden im Alpenraum in der Klimazukunft 2071 bis 2100 des Modells HIRHAM4 für das Szenario A2. Dafür wurde in Anlehnung an den bekannten Palmer-Drought-Severity-Index ein modifizierter Index entwickelt. Die Ergebnisse zeigen eine Verdreifachung in der Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer Dürre im Vergleich zur Vergangenheit (1961 bis 1990). Die Intensitäten bei einer Dürre selbst sollen sich dabei verdoppeln. Der Autor betont mögliche Unsicherheiten in den Ergebnissen, die sich aus den zu Grunde liegenden Niederschlagsszenarien des Klimamodells ergeben.

Besondere Schwierigkeiten in der Ableitung von Klimaszenarien hinsichtlich Trockenperioden oder landwirtschaftlicher Dürren ergeben sich aus der schlechten Abbildung von Persistenzen außergewöhnlicher Trockenphasen in Klimamodellen (Blenkinsop und Fowler, 2007). Die Autoren betonen in ihrer Untersuchung für Europa, dass die simulierten Veränderungen in der Häufigkeit und Charakteristik von Dürren ganz wesentlich vom Untersuchungsgebiet und der Art des Ereignisses abhängen. Die Unsicherheiten der Ergebnisse wiederum sind von der Wahl des Regionalmodells sowie des antreibenden Globalmodells abhängig.

In einer aktuellen Studie von Heinrich und Gobiet (2011) wurde die zukünftige Veränderung von Feuchte- und Trockenepisoden in Europa aus acht regionalen Klimamodellsimulationen unter Verwendung des IPCC-Emissionsszenarios A1B (ENSEMBLES-Projekt) untersucht. Dabei zeigen sich speziell im äußersten Norden (Süden) Europas eindeutige und statistisch signifikante Veränderungen zu feuchteren (trockeneren) Bedingungen im Vergleich von 2012 bis 2050 gegenüber 1961 bis 1990. Im Alpenraum sind die Ergebnisse etwas differenzierter zu betrachten, hier zeigt sich im scZ-Index (self-calibrated Palmer Z-Index) im Mittel eine Verschiebung zu feuchteren Bedingungen von +37 % im Winter sowie zu trockeneren Bedingungen von –31 % im Sommer. Bei der Analyse der Charakteristiken der Trocken- und Feuchtephasen selbst ergeben sich im Alpenraum keine bedeutenden Veränderungen in der Klimazukunft.

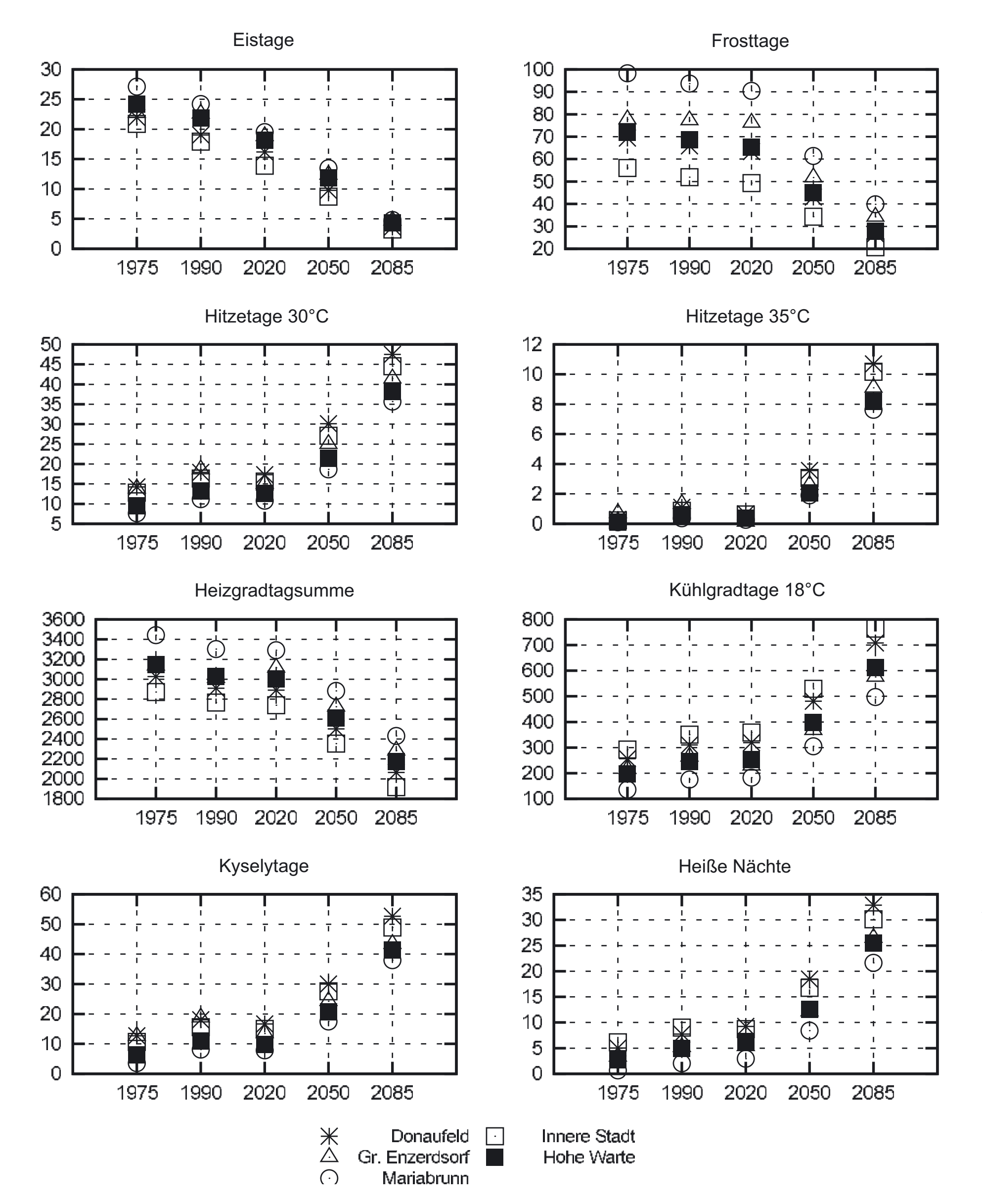


Abbildung 4.12 Auswahl an thermischen Indikatoren für 5 Standorte in Wien. Die Auswertungen beruhen auf fehlerkorrigierte Regionalszenarien von REMO-UBA A1B. Adaptiert nach Formayer et al. (2007)

Figure 4.12 Selection of thermal indicators for 5 locations within Vienna, based on bias corrected regional scenarios of REMO-UBA A1B. Adapted after Formayer et al. (2007)

Änderungsszenarien von Dürren sind vor allem auf der regionalen Skala mit Unsicherheiten behaftet. Die wesentlichsten Gründe dafür sind immer noch schwierig zu simulierende Größen, wie die lokale Bodenfeuchte, der regionale Niederschlag oder aber auch die Simulation von Persistenzen der atmosphärischen Zirkulation.

Niederschlag

Groismann et al. (1999) untersuchten die Veränderung der statistischen Charakteristiken des Niederschlags aus langjährigen, täglichen Messungen acht unterschiedlicher Länder der Welt. Dabei wurde gezeigt, dass sich der Formparameter der Verteilung örtlich und zeitlich quasi-konstant verhält, aber der Skalierungsparameter in Raum und Zeit höchst variabel ist. Eine beobachtete Veränderung des Mittelwerts von +5 % bedingt somit eine 4-fache Zunahme der moderaten Extreme (z. B. 25 mm Grenzwert für Russland, Kanada, Norwegen, Polen), da sich die Anzahl der Niederschlagstage selbst nicht verändert hat. Für die Zukunft lässt sich daraus das Potential für eine erhöhte Wahrscheinlichkeit von starken Niederschlägen in einer wärmeren (und feuchteren) Atmosphäre ableiten. Eine mathematisch-theoretische Bestätigung dieser Hypothese ist in Katz (1999) zu finden.

Frei et al. (2003) vergleichen Niederschlagsindizes aus Simulationen von fünf verschiedenen regionalen Klimamodellen (ca. 50 km Auflösung) im Alpenraum auf Tagesbasis und schlussfolgern, dass die Modelle in der Lage sind, die wichtigen

räumlichen Muster von mesoskaligen (200 km), starken Niederschlägen (90. Perzentil) klimatologisch zu reproduzieren.

In einer nachfolgenden Studie (Frei et al., 2006) wurde die zukünftige Veränderung von Niederschlagsextremen im Alpenraum anhand von sechs verschiedenen regionalen Klimamodellen untersucht. Die Modelle zeigen dabei im Winter (DJF) eine Erhöhung der Anzahl der Niederschlagstage als auch der Niederschlagsintensitäten von 10 %. Betreffend der mehrtägigen Starkniederschläge (5-tägige Summen, 5-jährliches Ereignis) lässt sich aber für Mitteleuropa kein einheitliches Vorzeichen im Klimasignal erkennen.

Es zeigt sich eine deutliche Abnahme bei der Anzahl der Niederschlagstage als auch bei den mittleren saisonalen Summen. Bei den extremen 1-Tagesniederschlägen (5, 10 bzw. 50 jährliche Ereignisse) zeigt sich aber bei fast allen Modellen eine deutliche Erhöhung der Intensitäten.

Hofstätter und Matulla (2010) analysierten Starkniederschlagsereignisse in Österreich auf Tagesbasis mittels statistischer Downscaling-Verfahren für die Klimazukunft aus ECHAM5. Sie finden eine noch stärkere Zunahme der Intensitäten als Frei et al. (2006) von 17–26 % im Sommerhalbjahr (2007 bis 2051 verglichen mit 1963 bis 2006) bei 30-jährlichen Niederschlagsereignissen. Des Weiteren wurde eine besonders ausgeprägte Zunahme im Südosten und Osten Österreichs während der Herbstmonate gefunden, welche als Hinweis auf eine mögliche Veränderung der Häufigkeit von bestimmten Wetterlagen (Vb-Lagen) im östlichen Alpenraum interpretiert wurde.

Die Veränderungen der jährlichen maximalen Tagesniederschläge wurde für Mitteleuropa (Sommer – JJA) auch von Beniston et al. (2007) analysiert. Für die Periode 2071 bis 2100 zeigen die in PRUDENCE verwendeten regionalen Klimamodelle dabei aber höchst diverse Ergebnisse. Die Änderungen der Mittelwerte umfasst je nach Modell –45 % bis –10 %, die jährlichen Tagesmaximalwerte ändern sich um –26 % bis +22 %.

Dankers und Hiederer (2008) zeigten bei einer Analyse des regionalen Klimamodells HIRHAM, dass sich die extremsten Tagesniederschläge (Intensität: 99er Perzentil) vor allem in der Osthälfte Österreichs in der Periode 2071 bis 2100 bereits um bis zu 40 % stärker werden könnten. Auch die jährlichen Maximalwerte von 5-tägigen Niederschlagssummen deuten auf eine ähnliche Zunahme hin (vorwiegend Alpennordseite).

Hochaufgelöste regionale Klimamodellsimulationen (< 20 km) wurden von Smiatek et al. (2009) für den Alpenraum verglichen. Dabei zeigt sich erneut eine Bestätigung der Abnahme des mittleren Sommerniederschlags (JJA) um 30 % sowie eine Zunahme der Winterniederschläge um 5 % bis 25 % in der GAR. Überraschend und konträr zu anderen Untersuchungen ist die Erkenntnis, dass sich die Mengen bei den starken Niederschlagsereignissen (90er Perzentil aller Niederschlagstage) im Sommer kaum verändern sollen.

Die zukünftige Veränderung der jährlichen Niederschlagsmaxima mit 20-jährlicher Wiederkehrwahrscheinlichkeit wurde von Nikulin et al. (2011) für Europa analysiert. Die Autoren verwendeten das regionale Klimamodell RCA3 in 49 km Auflösung und analysierten sechs Simulationen mit unterschiedlichen Globalmodellen als Antrieb. Im Alpenraum wird eine Erhöhung der Intensitäten bei 20-jährigen Ereignissen im Winter von 5 % bis 15 % sowie im Sommer von etwa 10 % bis 20 % simuliert.

Abschließend bleibt anzumerken, dass in fast allen Studien über Niederschlagsextreme der Zukunft bis dato lediglich die Änderungen von Mittelwerten auf saisonaler Basis oder die Überschreitungswahrscheinlichkeiten von fixen Perzentilen für große Gebiete untersucht wurde. Des Weiteren wird mehrfach auf eine mögliche überproportionale Veränderung der Niederschlagsintensitäten besonders bei höheren Perzentilen hingewiesen. Je detaillierter die Analysen über Niederschlagsextreme sind desto größer werden im Allgemeinen die Unsicherheiten und Modelldifferenzen. Oft zeigt sich in den Ergebnissen der Simulationen hoch aufgelöster Regionalmodelle ein derart komplexes räumliches Muster im Klimasignal für die Zukunft, dass eine klare Interpretation nicht möglich ist. Vor allem für Aussagen über zukünftige Niederschlagsextreme insbesondere im klimatisch komplexen Alpenraum bleibt somit ein erheblicher Forschungsbedarf bestehen. Des Weiteren besteht auch erheblicher Forschungsbedarf in der Frage der Ursachen und Wechselwirkungen der einzelnen physikalischen Mechanismen bzw. Prozesse, welche zu einer Niederschlagsänderung führen können. Dies gilt insbesondere für extreme Niederschlagsereignisse mit konvektivem Charakter.

Wind

Extreme Windgeschwindigkeiten können bei meteorologischen Phänomenen unterschiedlichster Art entstehen. Diese Phänomene reichen von Frontpassagen und Sturmtiefs über Gewitter bis hin zu Föhnereignissen. Vor allem kleinräumige und kurzlebige Phänomene werden dabei oft gar nicht oder nur indirekt über Parametrisierungen in den aktuellen Klimamodellen erfasst. Fast alle Aussagen über Veränderungen der Sturmhäufigkeiten und Intensitäten in der Klimazukunft beziehen sich somit auf die Untersuchung von großräumigen Tiefdruckgebieten und deren Druckfeldern. Ein solches Er-

eignis ist beispielsweise das Orkantief Kyrill im Jänner 2007 über Europa. Für extreme Windereignisse die mit Gewittern oder Frontpassagen verbunden sind, existieren für Österreich derzeit keine Untersuchungen.

Die Analyse von Indizes für großräumige Windextreme für den Winter (DJF) aus acht verschiedenen Regionalmodellen (Projekt PRUDENCE) von Beniston et al. (2007) zeigt eine schwache Zunahme von unter 5 % des 90er Perzentils der Windgeschwindigkeit (Tagesmittelwert) für Österreich in der Zukunft.

Als Ursache dieser Zunahme wird die vom Globalmodell HadAM3H simulierte Verstärkung des Druckgradienten über Nordwesteuropa angegeben. Die Intensivierung der Frontalzone im Winter soll so zu einer verstärkten Tiefdrucktätigkeit in Europa führen. Im Sommer (JJA) wird eine Zunahme von Tagen mit niedrigen Windgeschwindigkeiten angegeben.

Zu ähnlichen Ergebnissen kommen auch die Autoren einer anderen Studie (Donat et al., 2010), in der das Risiko von Sturmschäden in Europa analysiert wird. Globale Klimamodelle zeigen demnach für die nächsten Jahrzehnte eine weitere Verlagerung der Zugbahnen der atlantischen Tiefdruckgebiete nach Norden hin (55. bis 60. Breitengrad). In der Nordhemisphäre zeigt sich gleichzeitig eine deutlich reduzierte Anzahl von extratropischen Tiefdruckgebieten.

Sogenannte Sturmtiefs weisen allerdings eine verstärkte Häufigkeit an bestimmten Hot Spots – wie etwa im Bereich des Nordost-Atlantiks – auf. In Europa selbst nimmt in den Multi-Model-Ensembles regionaler Klimamodellsimulationen die Frequenz der Sturmtage um 19-33 % zu, Nordwest- und Westwetterlagen werden häufiger. Darüber hinaus steigt die Windgeschwindigkeit bei Sturmereignissen in großen Teilen von Mittel- und Nordeuropas um 5 %. Diese Zunahme wird hauptsächlich durch den höheren Wasserdampfgehalt der Atmosphäre und der damit verbundenen Zunahme verfügbarer Energie begründet. Eine generelle Abnahme und Abschwächung der Sturmtätigkeit ist im Mittelmeerraum zu erkennen (Abbildung 4.13).

Nikulin et al. (2011) vergleichen die Simulationen des Regionalmodells RCA3, jeweils angetrieben mit sechs unterschiedlichen Globalmodellen, und zeigen, dass für das Gebiet von Österreich mit keiner bzw. einer schwachen Abnahme der Windgeschwindigkeiten bei 20-jährigen Ereignissen von täglichen Windmaxima zu rechnen ist (Multi-Model Mittel). Allerdings unterscheiden sich die Ergebnisse im Detail deutlich und reichen je nach Modell von −10 bis +10 %. Klimaprojektionen über Extremwerte des Windes sind somit immer noch mit bedeutenden Unsicherheiten behaftet. Viele Fragestellungen müssen darüber hinaus erst hinreichend untersucht werden.

Gewitter und Hagel

Veränderungen in der Häufigkeit oder Intensität von Gewittern und Hagel sind eine der aktuellsten aber auch schwierigsten Fragen der Klimaforschung. Die Schwierigkeiten liegen vor allem in der Seltenheit des Phänomens und der damit

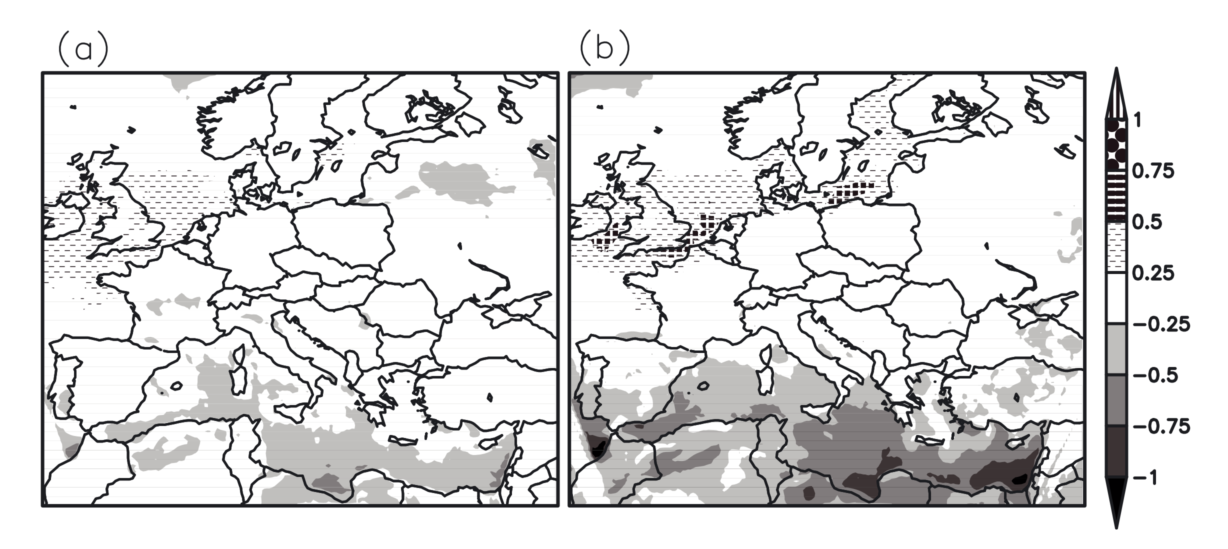
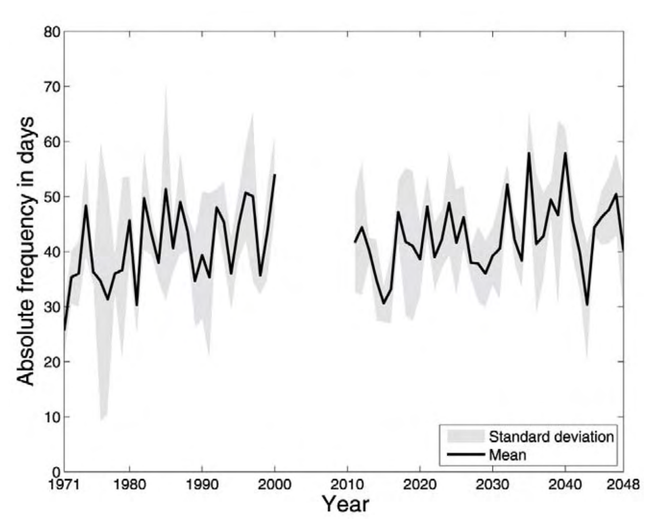


Abbildung 4.13 RCM-Ensemble Mittelwert für das anthropogene Klimasignal des 98er Perzentils der maximalen täglichen Windgeschwindigkeit im Klimaszenario A1B. Die Stärke der Änderungen ist durch die Schattierung dargestellt (Einheit: m/s). a) A1B (2021–2050) −20 °C. b) A1B (2071–2100) −20 °C. Adaptiert nach Donat (2010); verwendet unter Creative Commons 3.0

Figure 4.13 RCM-ensemble mean climate change signal of the 98 percentile of the maximum daily wind speed from the A1B scenarios. The strength of the change (m/s) is indicated by the shading. a) A1B (2021–2050) −20 °C. b) A1B (2071–2100) −20 °C. Adapted after Donat (2010); verwendet unter Creative Commons 3.0



Long-term trends of hail-related weather types in an ensemble of regional climate models using a Bayesian approach / Kapsch, M.-L., Kunz, M., Vitolo, R., Economou, T. / Journal of Geophysical Research 117 © 2012 American Geophysical Union. All Rights Reserved

Abbildung 4.14 Anzahl der mit Hagel verbundenen Wetterlagen für den Kontrolllauf (C20, 1971–2000) sowie für die zukünftigen Szenarien für das Modell CCLM-Echam5, CCLM-KL, und CCLM-CC3ma. Quelle: Kapsch et al., 2012

Figure 4.14 Numbers of weather pattern associated with hailstorms within the control run (C20, 1971–2000) and future scenarios of the model CCLM-ECHAM5, CCLM-KL and CCLM-CC3ma. Source: Kapsch et al., 2012

verbundenen unzureichenden Datengrundlage für die Vergangenheit begründet. Vor allem für den Westen der USA, aber auch für Mitteleuropa existieren einige erste Arbeiten, die mit abgeleiteten Hagel- oder Konvektionsindizes arbeiten.

Für Mitteleuropa zeigt sich dabei eine Zunahme von Tagen mit einer erhöhten Konvektionsbereitschaft in den letzten 30 Jahren (Mohr und Kunz, 2013). Als Ursache werden die Erhöhung der bodennahen Temperatur und spezifischen Feuchte genannt. Die positiven Trends in den Konvektionsindizes zeigen sich allerdings nicht mehr so deutlich, wenn auch vertikale Stabilität der atmosphärischen Schichtung mit berücksichtigt wird.

In der Analyse von Wetterlagen, die über ein hohes Potential für Hagelereignisse verfügen, zeigt sich ebenfalls eine schwache, aber statistisch signifikante, Zunahme (Kapsch, 2011, Abbildung 4.14). Regionale Klimamodellsimulationen lassen in diesem Zusammenhang keine Veränderung für die Zukunft (2010 bis 2050) erkennen (Kapsch et al., 2012).

Eine weitere Untersuchung von regionalen Klimamodellsimulationen zum Hagelpotential (PH-Index) über Deutschland lässt eine leichte Zunahme des PHI im Nordwesten und Süden erkennen (Mohr und Kunz, eingereicht 2013b).

Zum Schluss soll auf eine – in der wissenschaftlichen Gemeinschaft kontrovers diskutierte – Studie über die Entwicklung von Gewittern und Hagel im Westen der USA hingewiesen werden (Mahoney et al., 2012). Die Autoren finden für die Zukunft eine Abnahme von Hagel, trotz einer Zunahme der Häufigkeit von starken Gewittern und Hagel in höheren Luftschichten. Dies wird auf eine Zunahme der Höhe des Schmelzniveaus in den Gewittern im Klimawandel zurückgeführt. Durch die höhere Schmelze kommt damit weniger Hagel am Boden an. Dies führt zu einer Abnahme des Schadensrisikos durch Hagel, aber zu einer möglichen Zunahme des Risikos durch lokale Überschwemmungen.

Zusammenschau Extremereignisse

Die Erfassung von Veränderungen der Extremwerte einzelner Klimaelemente für Österreich stellen sowohl für die Analyse von Messdaten, aber noch viel mehr für die Modellierung mittels Klimamodellen, eine große Herausforderung dar. Diese Aussage ergibt sich schon allein aus der Definition von Extremereignissen als besonders selten auftretende Ereignisse. Neben der Seltenheit des Eintretens können Extremereignisse auch sehr kleinräumig sein (z. B. Gewitterniederschläge), was ihre Erfassung noch zusätzlich erschwert. Bestehende Messnetze sind daher oft nicht in der Lage, Extremereignisse zu erfassen. Für die Analyse von Messdaten braucht man sehr lange und homogene Beobachtungsreihen um statistisch signifikante Veränderungen der Extreme bestimmen zu können. Im Falle der Klimamodelle ist eine entsprechende Abbildung der zugrundeliegenden physikalischen Prozesse, die die Extremereignisse verursachen, notwendig. In Band 1, Kapitel 3 und 4 wurde gezeigt, dass diese Voraussetzungen meist nicht erfüllt sind. Das heißt, dass die entsprechenden Messreihen oft zu kurz sind und die Klimamodelle derzeit noch nicht in der Lage sind, Extremereignisse der meisten Klimaelemente zu simulieren. Diesen Wissenslücken steht jedoch die Notwendigkeit der Aussagen für Extremwerte auf Grund ihrer oft drastischen Folgewirkungen (z. B. Hochwasser- und Sturmschäden) gegenüber. Die Auswertung von Studien auf internationaler Ebene (siehe z. B. Seneviratne et al., 2012) zeigt die große Relevanz dieser Problemstellung.

Für den Alpenraum und auch für Österreich gibt es mehrere Versuche, mittels Regionaler Klimamodelle Aussagen über Änderungen von Extremereignissen zu erhalten (siehe Abschnitt 4.3). Zusätzlich können verschiedene Methoden angewandt werden, um die Aussagenschärfe über Veränderungen der Extremwerte sowohl für die Vergangenheit aber besonders auch für die Zukunft zu erhöhen:

- Erzeugen hinreichend großer Stichproben durch Methoden der Statistik und anschließender Anwendung von Methoden der Extremwertstatistik (siehe z. B. Parajka und Blöschl, 2012).
- Abschätzung der Extremwerte aus der Veränderung von robusteren Lagemaßen einer Häufigkeitsverteilung (z. B. Veränderung des Extremniederschlags aus der Verschiebung des Mittelwerts des Niederschlags, siehe z. B. Benestad et al., 2013).
- Abschätzung aus Proxygrößen beziehungsweise durch Kausalmodellierungen (siehe z. B. Matulla et al., 2008; Lenderink und Meijgaard, 2008).

Fasst man die bestehenden Studien die in Band 1, Kapitel 3 und 4 vorgestellt wurden zusammen und bewertet sie entsprechend ihrer Evidenz und Übereinstimmung, können für Österreich folgende Änderungen festgestellt werden:

- Temperaturextreme haben sich in der Vergangenheit sehr ähnlich verändert wie die Mitteltemperaturen. Ähnliches ist auch für die Zukunft mit großer Sicherheit zu erwarten. Das bedeutet, dass heiße Tage seit 1980 deutlich zugenommen haben und auch in Zukunft deutlich zunehmen werden (analoge Abnahme der kalten Tage).
- Die Bewertung der Änderung von Niederschlagsextremen entzieht sich sowohl für die Vergangenheit aber insbesondere für die Zukunft einer quantitativen Aussage. Großräumige Extremniederschläge haben seit 1980 eher zugenommen (Schöner et al., 2011). Aus der Zunahme des Niederschlagsmittels im Winter bis 2050 ist auch eine mäßige Zunahme der großflächigen Extremereignisse nördlich des Alpenhauptkammes zu erwarten.
- Winterliche Sturmereignisse, die in Zusammenhang mit großräumigen Druckgebilden stehen, haben trotz einer massiven Temperaturzunahme seit 1980 zu keiner Zunahme der Sturmhäufigkeit geführt. Auch für die Zukunft ist derzeit keine Veränderung ableitbar.

4.4 Schnittstellen zur Klimafolgenforschung
4.4 Interfaces to impact research

4.4.1 Einleitung

Die Beschäftigung mit dem Klima, sowohl der Vergangenheit als auch seiner zukünftigen Entwicklung, ist schon lange nicht mehr nur den Meteorologen oder den Klimaforschern im engeren Sinne vorbehalten. Meteorologisch / klimatologische Daten werden in einer Unzahl an Anwendungen in den verschiedensten Disziplinen benötigt (vgl. Tabelle 4.2). Diese reichen von der direkten Verwendung von meteorologischen Zeitreihen in Prozessmodellen in der Hydrologie oder der Pflanzenwachstumsmodellierung bis hin zu hochkomplexen Indikatoren für die Versicherungswirtschaft oder sozio-ökonomischen Fragestellungen. Die meisten Personen, die sich mit Klimaszenarien beschäftigen, aber nicht direkt aus der Klimaforschung kommen, sind es zwar gewohnt mit meteorologischen Daten zu arbeiten, gehen aber bei der Verwendung von Klimaszenariendaten davon aus, dass diese dieselbe Qualität und statistischen Eigenschaften besitzen, wie die Beobachtungen. Natürlich können Modellergebnisse diesen Anspruch nicht erfüllen und daher müssen Klimaszenariendaten nachbearbeitet werden. Dies sollte durch Experten erfolgen, die auch Erfahrung mit der Klimamodellierung haben, da bei der Nachbereitung das Wissen über die Qualitäten und Probleme des jeweiligen Klimamodells von Vorteil ist.

4.4.2 Spezifische Anforderungen der Klimafolgenforschung

Im Rahmen des ACRP-Projekts KlimDatz (Formayer et at., 2011b) wurde unter anderem untersucht, welche Personen und Einrichtungen die Daten und Informationen auf einem österreichischen Klimadatenzentrum nützen würden (Loibl et al., 2011b). In Tabelle 4.2 sind die Hauptergebnisse dieser Untersuchung dargestellt, wobei die Gesamtzahl an Rück-

Tabelle 4.2 Nutzergruppen in Österreich, die Klimadaten (sowohl Beobachtungen als auch Szenarien) verwenden. Quelle: Loibl et al. (2011b)
Table 4.2 Austrian user groups working with climate data (observation as well as scenarios). Source: Loibl et al. (2011b)

Benutzergruppen	[%]	Benutzergruppen	[%]
Klimafolgenforschung	31	Behörden & Kommunen	9
Land- & Forstwirtschaft	23	Versicherungen, Exekutive, Katastrophenschutz	5
Wissenschaft	14	Bildung, Medien, Öffentlichkeit	4
Energie / Wasserwirtschaft	10	Sonstige	4

meldungen 139 betrug. Dies bedeutet bei der geringen Größe der österreichischen Forschungsgemeinschaft eine sehr hohe Rücklaufquote. Man erkennt deutlich das breite Interesse der Forschung aber auch der Gesellschaft an Informationen zum Klima in der Vergangenheit und der Zukunft.

Etwa die Hälfte der Interessierten kommt direkt aus dem Forschungs- und Wissenschaftsbereich. Bei dieser Gruppe muss man davon ausgehen, dass die Ansprüche an die Qualität der räumlich / zeitlichen Auflösung und der verfügbaren Parameter am höchsten ist, da diese Gruppe die Klima(szenarien)-Daten in eigenen Prozessmodellen und Algorithmen weiter verwendet. Die Nutzer aus den angeführten Wirtschaftssektoren, den Behörden und der interessierten Öffentlichkeit wiederum sind weniger an Datenreihen interessiert, sondern an aufbereiteten Informationen entweder von direkten klimatologischen Analysen, als auch an aufbereiteten Informationen aus der Klimafolgenforschung.

Die Bereitstellung an klimarelevanter Information für die letztere Gruppe muss Aufgabe der gesamten Forschungsgemeinschaft sein. Um die Qualitätsansprüche der ersten Gruppe zu erfüllen, sind in erster Linie die Klimaforschung selbst – und hier insbesondere auch die Klimamodellierer – gefordert, da für die Aufbereitung von Klimaszenarien unbedingt das Wissen für die Qualität und die Probleme der verwendeten Klimamodelle und Regionalisierungsansätze mit einfließen muss.

Der überwiegende Teil der Modelle und Ansätze in der Klimafolgenforschung wurde entwickelt, um Untersuchungen in der Gegenwart oder der Vergangenheit durchzuführen. Die Komplexität der verwendeten Modelle und Ansätze richtete sich hierbei unter anderem auch nach der Verfügbarkeit an meteorologischen Daten. Durch die Weiterentwicklung der Messtechnik, der Datenspeicherung und -bearbeitung wurde es in den letzten Jahrzehnten immer leichter, Zugang zu zeitlich hoch aufgelösten meteorologischen Daten und zu mehr meteorologischen Parametern zu bekommen.

Ein gutes Beispiel für diese Weiterentwicklung ist die Berechnung der Verdunstung. War es früher meist ausreichend, die Verdunstung mittels der Haudeformel (Haude, 1955) aus Temperatur und Luftfeuchtigkeit auf Monatsbasis zu schätzen, so wird heute häufig der Penman-Monteith-Ansatz (Monteith, 1981) gewählt. Für diese Methode benötigt man jedoch zumindest tägliche Daten und man braucht zusätzlich die Strahlung und Windgeschwindigkeit.

Für die Klimafolgenforschung wäre es natürlich das Einfachste, wenn für Untersuchungen unter Szenariobedingungen die gleichen Modelle angewendet werden könnten wie für die Untersuchungen in der Vergangenheit. Dies bedeutet jedoch, dass die Qualität der meteorologischen Szenariodaten denen von meteorologischen Messungen entsprechen sollten und neben Temperatur und Niederschlag immer häufiger auch Szenarien für die relative Luftfeuchtigkeit, die Globalstrahlung und den Wind benötigt werden. Zudem sollten die Szenariodaten die statistischen Eigenschaften von Punktdaten erfüllen und nicht von Daten auf Gitterflächen, da die Klimafolgenmodelle meist mit Stationsdaten – und damit Punktdaten – kalibriert sind. Wie aus den Untersuchungen im Rahmen von KlimDatz (Loibl et al., 2011b) hervorgeht, werden auch immer häufiger sub-tägige zeitliche Auflösungen (15 Minuten- oder Stundendaten) gewünscht.

Diese steigenden Anforderungen der Klimafolgenforschung sind aus Sicht der Klimamodellierung nur schwer zu erfüllen. Bei den statistischen Methoden der Regionalisierung von Klimaszenarien werden zwar meist lokale Stationsmessungen zur Ableitung der Szenarien verwendet, wodurch die Ergebnisse jenen von Punktdaten entsprechen, jedoch sind die statistischen Zusammenhänge zwischen großräumigen meteorologischen Feldern und lokalen Bedingungen nicht für alle meteorologischen Parameter gleich gut und generell können bessere Aussagen auf Monatsbasis gemacht werden. Die statistischen Zusammenhänge werden auf Tages- und Subtagesbasis deutlich schwächer.

Bei der regionalen Klimamodellierung wiederum ist es zwar möglich, Tages- und auch Subtagesdaten direkt zu berechnen – in reclip:century wurden der Großteil der Parameter stündlich abgespeichert – jedoch reicht die Qualität der derzeitigen Modelle nicht aus, die Ergebnisse direkt in der Klimafolgenforschung zu verwenden. Hierzu muss eine Nachbearbeitung der Modellergebnisse erfolgen. Neben einer Fehlerkorrektur ist auch eine weitere Lokalisierung der Ergebnisse notwendig, da die derzeit höchstaufgelösten regionalen Szenarien eine Auflösung von 10 km haben. Somit entspricht ein Gitterpunkt einer Fläche von 100 km². Diese Auflösung ist noch nicht geeignet, die Komplexität des Geländes innerhalb der Alpen adäquat abzubilden.

4.4.3 Statistische Nachbearbeitung (regionaler) Klimamodellergebnisse

Methoden der statistischen Fehlerkorrektur

Die hier beschriebenen Fehlerkorrekturen beziehen sich auf Klimaszenarien aus dynamischem Downscaling (regionaler Klimamodellierung). Beim statistischen Downscaling fließen bei der Methodik selbst lokale Beobachtungsdaten ein. Diese können daher nicht für eine weitere Verbesserung der Ergebnisse verwendet werden.

Wie in Abschnitt 4.2 dargestellt, können die absoluten Fehler regionaler Klimamodelle bei uns im Alpenraum sowohl bei der Temperatur als auch insbesondere beim Niederschlag deutlich größer sein, als das Klimaänderungssignal bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts. Diese Problematik erlaubt es nicht, die Modellergebnisse direkt für Folgeuntersuchungen zu verwenden. Daher wurden in der Vergangenheit verschiedene Ansätze entwickelt, um die Szenarien für die Klimafolgenforschung nutzbar zu machen. Eine Übersichtsarbeit über diese Methoden und ihre Vor- und Nachteile bei Tagesniederschlägen im Alpenraum findet sich bei Themeßl et al. (2011a).

Die einfachste und älteste Methode, Klimaszenarien zu nutzen, besteht in der Verwendung des Klimaänderungssignals. Hierbei werden für zwei verschiedene Zeitscheiben (etwa die Perioden 1961 bis 1990 und 2071 bis 2100) die interessierenden Klimakenngrößen (z. B. Monatsmitteltemperatur) berechnet und die Differenzen zwischen diesen beiden Zeitscheiben bestimmt. Um aus dem Klimaänderungssignal wieder Zeitreihen zu generieren, kann man entweder das Klimaänderungssignal direkt auf reale Beobachtungsdaten aus dem Zeitraum der ersten historischen Zeitscheibe aufsetzen, oder diese mittels Wettergeneratoren erzeugen (siehe Abschnitt 4.2.2). Bei Szenarien auf Monatsbasis ist es auch möglich, vom Klimamodell eine Zeitreihe der Anomalien zu berechnen und diese auf die Klimatologie der Beobachtungen aufzusetzen. Diese Methode hat gegenüber der ersteren den Vorteil, auch Veränderungen der Variabilität zu berücksichtigen und nicht nur eine Mittelwertverschiebung, ist jedoch für Tagesdaten nicht geeignet.

Grundsätzlich kann man bei komplexeren statistischen Fehlerkorrekturen zwischen direkten und indirekten Methoden unterscheiden. Bei den direkten Methoden wird ein statistischer Zusammenhang zwischen demselben Parameter im Modell und der lokalen Beobachtung verwendet, also etwa Temperatur-Model versus Temperatur-Beobachtung. Die indirekten Methoden entsprechen jenen vom statistischen Downscaling (siehe Abschnitt 4.2), wo aus einen oder mehreren Modellparametern die lokale Größe geschätzt wird (etwa Analogmethode, oder Multiple Lineare Regression), wobei hier nicht Ergebnisse von Globalmodellen verwendet werden, sondern eben Ergebnisse der regionalen Modellierung.

Eine sehr erfolgreiche direkte Methode der Fehlerkorrektur auch von Tagesdaten ist das „Quantile mapping". Diese Methode wurde erstmals von Michele Déqué (Déqué, 2007) auf regionale Klimamodellergebnisse angewandt. Hierbei wird ein Parameter – etwa Tageswerte der Temperatur oder des Niederschlags – eines Klimamodells und der lokalen Beobachtung nach der Größe sortiert und eine empirische kumulative Häufigkeitsverteilung von beiden Datensätzen erstellt (siehe Abbildung 4.15). Aus den Differenzen dieser beiden empirischen Häufigkeitsverteilungen kann man entweder direkt eine Fehlerkorrekturfunktion bestimmen (Formayer, 2011a, Themeßl 2011b), oder man passt eine theoretische Verteilungsfunktion (Piani, 2009) an.

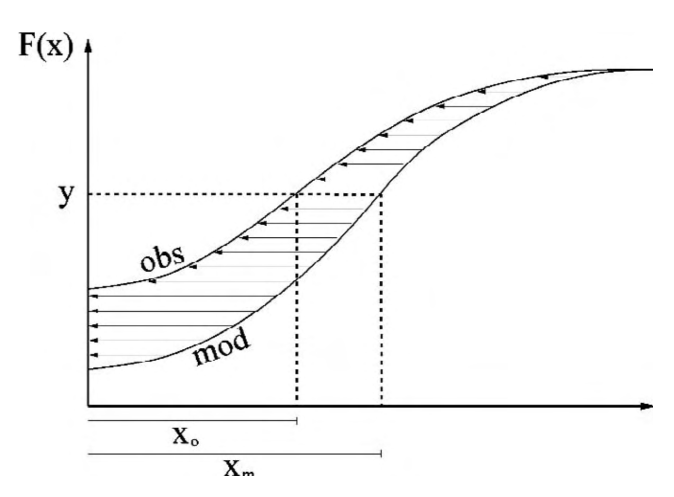


Abbildung 4.15 Schema der Fehlerkorrektur mittels Quantile mapping. Exemplarisch dargestellt ist die kumulative Häufigkeitsverteilung eines Parameters des Modells (mod) und der Beobachtung (obs). Für jeden Perzentilwert (y) wird die Differenz zwischen Modell und Beobachtung (Xm–Xo) bestimmt. Quelle: Formayer und Haas (2009)

Figure 4.15 Diagram of the quantile mapping bias correction technique. Shown is the cumulative frequency distribution of a parameter from the model (mod) and of the observation (obs). For every percentile value (y), the difference between model and observation (Xm–Xo) is calculated. Source: Formayer and Haas (2009)

Mithilfe des Quantile mapping erfolgt nicht nur eine Korrektur der mittleren Bedingungen, sondern es wird die gesamte Verteilungsfunktion einer Variablen von den Beobachtungsdaten auf die Klimamodellergebnisse übertragen. Dadurch wird nicht nur der Mittelwert nahezu perfekt reproduziert (siehe Abbildung 4.16), sondern auch „mäßige" Extreme. Werte, die innerhalb der ersten und 99. Perzentile liegen, sollten bei richtiger Implementierung durchaus reproduziert werden. Wirklich schadensverursachende Extreme, die nur alle 10–20 Jahre oder noch seltener vorkommen, sind hingegen problematisch. Diese Ereignisse sind häufig nicht einmal in den Beobachtungsdaten enthalten. Bei Stationen, wo diese vorkommen, sieht man häufig, dass diese absoluten Extreme wenig mit der Verteilungsfunktion unterhalb der 99er Perzentile zu tun haben, da hier besondere Prozesse oder die Überlagerung mehrerer Prozesse wirksam werden. Bei Untersuchungen von schadensverursachenden Extremen sind daher statistische Standardverfahren zur Fehlerkorrektur nicht hilfreich.

Eine wesentliche Voraussetzung für die statistische Fehlerkorrektur ist die Verfügbarkeit meteorologischer Daten. Um

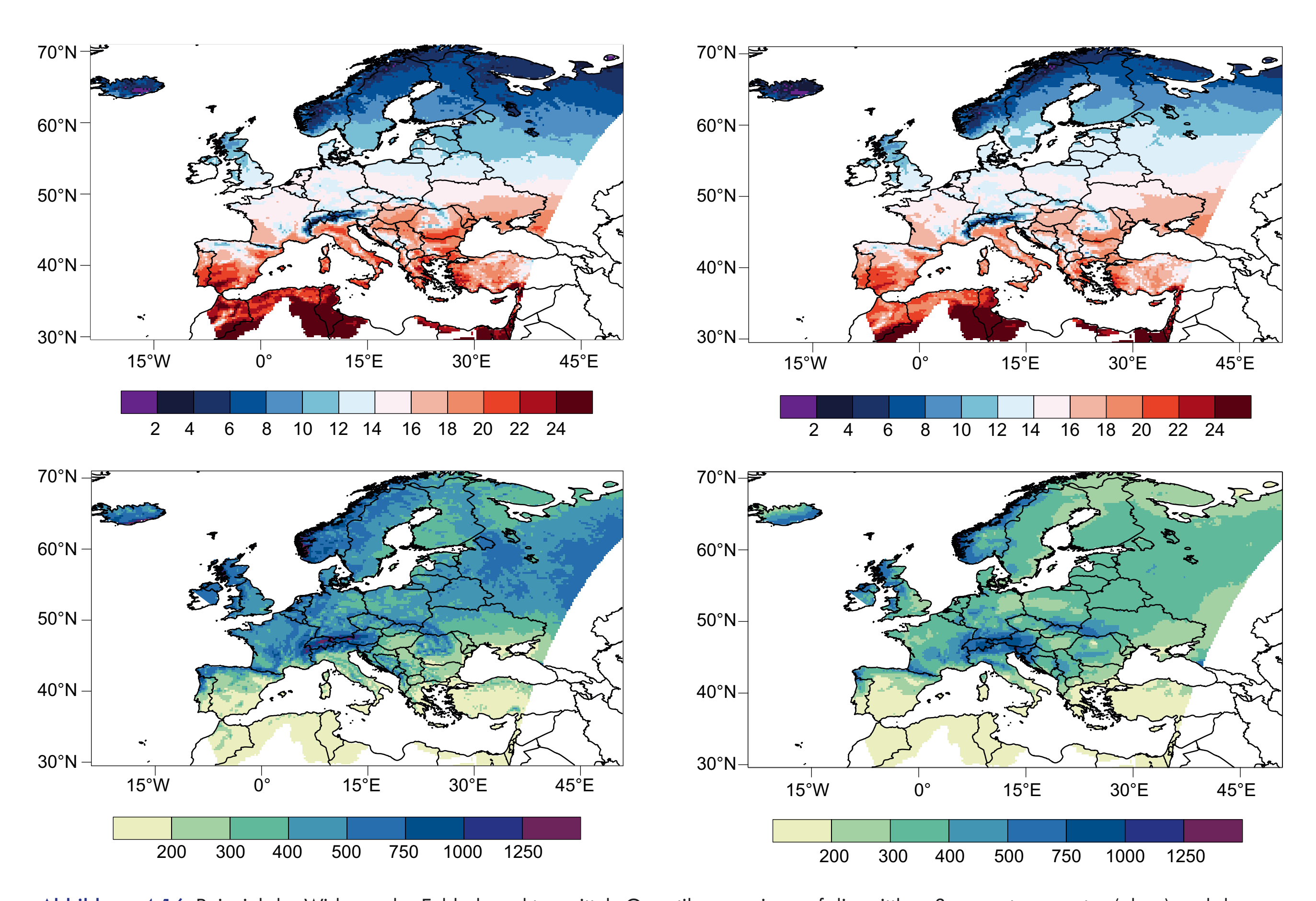


Abbildung 4.16 Beispiel der Wirkung der Fehlerkorrektur mittels Quantile mapping auf die mittlere Sommertemperatur (oben) und den Sommerniederschlag (unten) in Europa. Links der mittlere Fehler der unkorrigierten Ergebnisse des Regionalmodells; rechts der mittlere Fehler nach Fehlerkorrektur (Basisszenario REMO Zeitraum 1971–2000 aus ENSEMBLES; Beobachtungen E-OBS)

Figure 4.16 Example of the effect of bias correction with quantile mapping on summer temperature (up) and on summer precipitation (down). Left is the mean bias of the uncorrected results of the regional model and right is the mean bias after bias correction (Base scenario REMO 1971–2000 from ENSEMBLES; Observations from E-OBS)

etwa eine hinreichend große Anzahl an Beobachtungsdaten für ein Quantile Mapping auf Tagesbasis zu haben, sind mindestens 20 Jahre an Beobachtungen, besser 30 Jahre, notwendig. Damit man die flächendeckende Verfügbarkeit von Klimamodellergebnissen auch nutzen kann, ist es sinnvoll, die Fehlerkorrektur nicht mittels Stationsdaten, sondern mit flächig interpolierten Daten durchzuführen. Innerhalb des EU-Projekts ENSEMBLE wurde hierfür ein europäischer Datensatz für Temperatur (Minimum, Maximum und Mittel) sowie Niederschlag auf Tagesbasis erstellt (E-OBS, Haylock et al., 2008), der beginnend mit 1950 bis laufend diese Daten mit 25 km Auflösung zur Verfügung stellt. Die Qualität dieses E-OBS-Datensatzes ist schon vielfach diskutiert worden und speziell im Alpenraum ist die verwendete geringe Stationsdichte nicht in der Lage, die räumliche Variabilität speziell des Niederschlags abzubilden. Oft ist aber E-OBS der einzig verfügbare Datensatz, der flächige Zeitreihen mit hinreichender Länge mit Tagesdaten zur Fehlerkorrektur zur Verfügung stellt. Für den Niederschlag gibt es im Alpenraum jedoch eine Alternative, die auch unbedingt verwendet werden soll. Der gerasterte Tagesdatensatz für Niederschlag der ETH Zürich (Frei und Schär, 1998) bietet gerasterte Tagesniederschläge von 1971 bis 1999 für den gesamten Alpenraum mit 10 km räumlicher Auflösung. Seit 2012 steht zudem eine erweiterte Version dieses Datensatzes zur Verfügung (EURO4M-APGD, Isotta et al., 2013).

Generell kann gesagt werden, dass mit komplexen Fehlerkorrekturverfahren wie dem Quantile mapping die Klimamodellergebnisse soweit aufbereitet werden, dass eine Verwendung in nachgeschalteten Prozessmodellen möglich ist. Dennoch werden bei diesen statistischen Verfahren Annahmen unterstellt, die nicht immer und nicht für jeden Parameter gegeben sein müssen. Beim Quantile mapping unterstellt man implizit, dass der Fehler des jeweiligen Klimamodells nur von der geografischen

Lage, der Jahreszeit und dem Perzentil des Wertes abhängt und dieser Zusammenhang nicht durch den Klimawandel verändert wird. Ein weiterer Nachteil ist, dass die Fehlerkorrektur für einzelne Gitterpunkte erfolgt und dadurch die räumliche Struktur etwa eines Niederschlagsfeldes modifiziert wird. Zudem erfolgt die Fehlerkorrektur für jeden Parameter separat. Dadurch kann die physikalische Konsistenz der Parameter untereinander geschwächt werden. Trotz dieser Einschränkungen bedeutet die Verfügbarkeit von flächigen, fehlerkorrigierten Regionalmodellszenarien einen bedeutenden Fortschritt für die Anwendung von Klimaszenarien in der Klimafolgenforschung.

Methoden der Lokalisierung

Die Fehlerkorrektur allein reicht in einer Region mit so komplexer Landschaft, wie dem Alpenraum, nicht aus, um die Anwendbarkeit von Klimaszenarien in der Folgenforschung sicherzustellen. Bei statistischem Downscaling oder der Fehlerkorrektur mit Stationsdaten erhält man natürlich auch nur Szenarien an den Stationen. Wenn flächige Szenarien oder Punktdaten an anderen Orten benötigt werden muss man sich mit der Problematik des Upscalings beschäftigen. Bei mit Rasterdaten fehlerkorrigierten Szenarien reicht hingegen die Auflösung vom einigen 10 km bei E-OBS und dem Niederschlagsdatensatz der ETH Zürich nicht aus, um etwa die alpinen Täler realistisch aufzulösen.

Mit der Problematik des Übergangs von Punktmessungen in flächige Daten hat sich in den letzten Jahren die COST-Aktion 719 (Szalai et al., 2004) beschäftigt. In Österreich haben sich Ahrens und Beck (2008) sowie Schaumberger (2011) intensiv mit dieser Problematik auseinander gesetzt. Bei allen diesen Ansätzen werden geostatistische Verfahren verwendet, wobei neben meteorologischen Werten zusätzliche Informationen, wie die Seehöhe, topografische Eigenschaften, etc., verwendet werden. Sind funktionale Abhängigkeiten gegeben (vor allem Seehöhenabhängigkeiten), so können diese für die Interpolation mit genutzt werden. Diese Methoden können direkt für Szenarien an Stationen verwendet werden.

Neben diesen rein vom Gelände abhängigen Methoden, ist es aber auch möglich, Informationen von remote sensing-Technologien, oder Wettervorhersagemodellen zu nutzen. Im Nowcasting-Produkt INCA der ZAMG (Haiden et al., 2010) werden all diese Verfahren genutzt, um meteorologische Parameter mit einer räumlichen Auflösung von 1 km für ganz Österreich und einer zeitlichen Auflösung von 1 Stunde (Niederschlag 15 min.) zu erstellen. Leider gibt es den INCA Datensatz noch zu kurz – seit 2003 für Temperatur und Niederschlag, seit 2005 auch für Strahlung, Luftfeuchte und Wind – um ihn direkt für die Fehlerkorrektur von Klimaszenarien zu nutzen. Jedoch ist es möglich, die INCA Informationen für die Lokalisierung von Klimaszenarien einzusetzen.

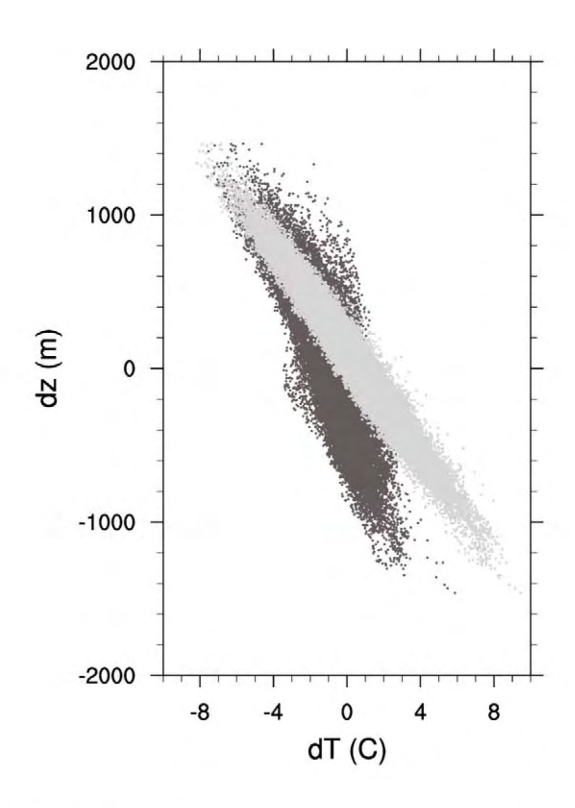
Eine Anwendung von INCA Daten zur Lokalisierung von Klimaszenarien ist in Abbildung 4.17 dargestellt (Pospichal et al., 2010; Formayer, 2011a) Aus den vorhandenen INCA-Daten wurden Monatsmittelwerte berechnet und bei der Temperatur die Differenz der Monatsmittelwerte zwischen INCA und Klimamodell bestimmt. Diese Differenz zwischen den hochaufgelösten INCA-Daten und den gröberen Modelwerten wird zwar vorwiegend durch die unterschiedliche Seehöhe bestimmt, beinhaltet jedoch auch Informationen über die Inversionssituation. In Abbildung 4.17 ist die unterschiedliche Temperaturstruktur eines 25 km Modells im Vergleich mit der 1 km INCA-Temperaturstruktur für die Jännertemperatur dargestellt. Hier wird nicht nur der Effekt der Seehöhe sichtbar, sondern auch die Wirkung der nächtlichen und winterlichen Inversion. Auch für andere Parameter, wie Niederschlag oder Globalstrahlung, zeigt die INCA-Klimatologie realistische räumliche Strukturen. Diese Strukturen können den regionalen Klimaszenarien aufgeprägt werden.

Methoden der zeitlichen Disaggregierung

Neben einer räumlichen Lokalisierung ist bei speziellen Anwendungen eine höhere zeitliche Auflösung als Tagesdaten notwendig. Bei neueren regionalen Klimamodellläufen wie etwa bei reclip:century werden zwar teilweise schon Stundenwerte abgespeichert, bei Verwendung von internationalen Szenarien sind jedoch häufig nur Tageswerte verfügbar. Zudem ist auch eine Fehlerkorrektur auf Stundenbasis nicht so einfach realisierbar.

Für die zeitliche Disaggregierung stehen je nach Parameter verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung. Eine gute Übersicht über gängige Methoden findet sich in Debele et al.(2007). Bei der Temperatur liefern die Klimamodelle üblicherweise das Tagesmaximum und -minimum, daher werden die meisten Disaggregierungsansätze auf die Interpolation dazwischen angewandt. Hierfür wird häufig ein Kosinusprofil verwendet. Für die Untersuchung von Beschneiungsstunden wurde von Hofstätter und Formayer (2011) ein anderer Ansatz verfolgt. Aus lokalen Stundendaten wurden die Temperaturwerte gelistet und an diesen gereihten Verlauf ein Polynom angepasst.

Die relative Luftfeuchtigkeit wird meist als Funktion der Temperatur angesetzt, wobei der Dampfdruck entweder als konstant angesetzt oder zwischen den Tagen interpoliert wird.



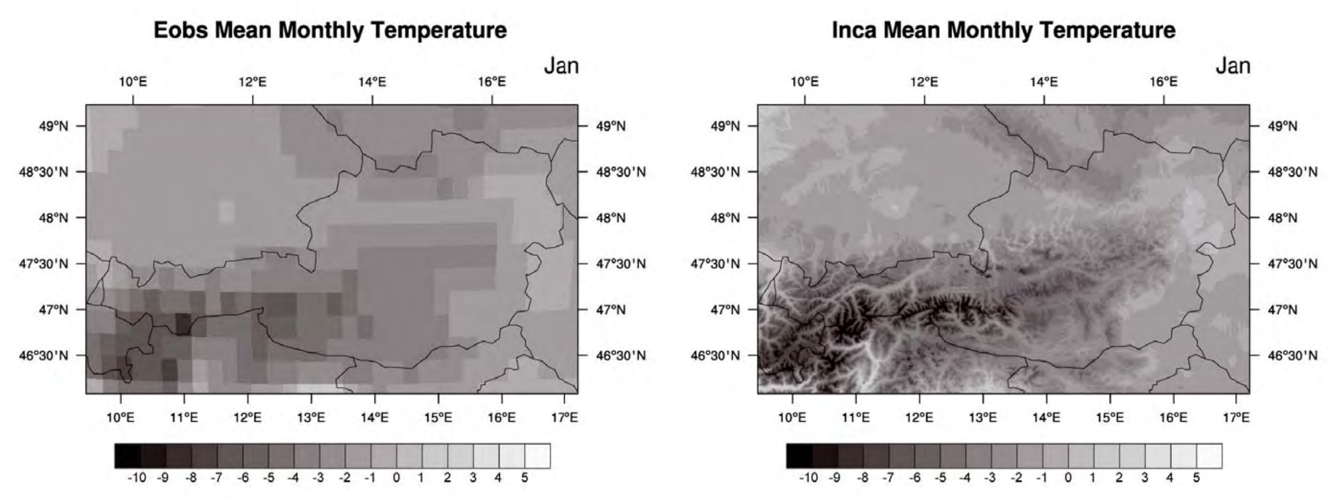


Abbildung 4.17 Vertikalgradient der Temperatur, bestimmt aus den Differenzen der mittleren Monatsmitteltemperatur im Jänner und im Juli zwischen INCA und E-OBS. Man erkennt die wesentlich komplexere Wiedergabe der winterlichen Temperaturinversionen in den INCA-Daten. Unten links: Temperaturstruktur eines Modells mit 25 km Auflösung im Jänner , unten rechts: INCA-Temperaturstruktur der Jännertemperatur (2003-2010). Quelle: Formayer (2011a)

Figure 4.17 Up: Vertical gradient of air temperature estimated form the difference of the mean monthly temperature in January and July between INCA and E-OBS. The figure highlights the more complex representation of the thermal inversion during winter in INCA. Bottom left: Temperature structure in a model with 25 km resolution in January. Bottom right: INCA temperature structure for January (average 2003-2010). Source: Formayer (2011a)

Am komplexesten ist die Disaggregierung von Niederschlagswerten, da hier kaum typische Tagesgänge vorgegeben sind. Yaqub et al. (2011) konnten zwar für Österreich eine räumliche und saisonale Differenzierung der Tagesgänge des Niederschlags aufzeigen, diese reicht jedoch für eine Disaggregierung nicht aus. Da eine realistische Darstellung besonders hoher Niederschlagsintensitäten für viele Anwendungen essentiell ist, kann man hier entweder nur mit Fallstudien arbeiten oder muss komplexere statistische Modelle (Koutsoyiannis et al., 2003) anwenden.

Synthetische und halbsynthetische Zeitreihen

Neben der Aufbereitung kontinuierlicher Klimamodellergebnisse ist es auch möglich, mittels statistischer Methoden zeitlich hoch aufgelöste Datensätze zu erzeugen, wobei nur das Klimaänderungssignal verwendet wird.

Eine Variante wurde von Strauss et al. (2013) für Österreich entwickelt. Hierbei wird auf einen Temperaturtrend ein Anomaliefeld aufgesetzt, das aus Beobachtungsdaten jeweils in Monatsblöcken entnommen wird. Alle anderen Parameter, wie Niederschlag, Strahlung, Luftfeuchte und Wind, werden demselben Monatsblock entnommen, wodurch eine physikalische Konsistenz erreicht wird. Mittels Zufallsgenerator werden aus dem Beobachtungszeitraum Monatsblöcke ausgewählt. Dadurch ist es möglich, eine beliebige Anzahl an Szenarien mit gleichem Temperaturtrend aber variabler saisonaler und interannualer Variabilität zu erzeugen.

Klassische Wettergeneratoren wie etwa LarsWG (Semenov et al., 1998) berechnen aus Beobachtungsdaten statistische Kenngrößen, die benutzt werden können, um Zeitreihen mit konstantem Klima und einer der Realität entsprechenden Variabilität auf Tagesbasis zu reproduzieren. Durch Aufsetzen des Klimaänderungssignals für Temperatur, Niederschlag und Strahlung können beliebig lange Zeitreihen für verschiedene Klimazustände erzeugt werden.

Einen Sonderfall stellen sogenannte Testreferenzjahre dar. Diese werden etwa bei der energetischen Gebäudemodellierung eingesetzt und sind sogar durch eine Norm geregelt (ÖNORM EN ISO 15927-4). Hierbei wird aus Stundendaten jener Parameter, die notwendig sind, um Energiebilanzen zu berechnen, ein Jahr zusammengestellt. Das Jahr wird aus realen Beobachtungen derart zusammengestellt, dass auf Monatsbasis die Klimanormalwerte erreicht werden. Dadurch spiegelt dieses Testreferenzjahr die mittleren Zustände wider, inklusive des typischen Tages- und Jahresganges und der typischen täglichen Variabilität. Durch das Aufsetzen der Klimaänderungssignale auf die Klimanormalwerte und die Auswahl der entsprechenden Monate kann man auch Testreferenzjahre unter Klimawandelbedingungen erzeugen.

4.4.4 Österreichische Anwendungsbeispiele

Der sich entfaltende Klimawandel wird verstärkt auf die verschiedensten Sparten des Lebens Einfluss ausüben. Die sich ändernde Verletzlichkeit von Ökosystemen oder urbaner Bebauungsstruktur sind Beispiele dafür. Daher sind Abschätzungen der künftigen Verletzlichkeiten ökologisch und ökonomisch von signifikanter Bedeutung. Solche Abschätzungen setzen eine enge Kooperation der Klimaforschung mit der Klimafolgenforschung voraus. Fast alle der im Band 2 dieses Berichts dargestellten Klimafolgenforschungsergebnisse wurden in Kooperation zwischen Klima- und Klimafolgenforschung durchgeführt. Hier ist nur eine kleine Auswahl kurz dargestellt.

Eine innovative Anwendung eines statistischen Downscaling-Verfahrens wurde bei einer direkten Verknüpfung von meteorologischen Feldern mit phänologischen Daten durchgeführt (Matulla et al. 2003). Die Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Phänologie (die Lehre vom Jahresablauf periodisch wiederkehrender Wachstums- und Entwicklungserscheinungen der Tier- und Pflanzenwelt) wurde bereits in mehreren österreichischen Studien untersucht (z. B. Scheifinger et al., 2002; Matulla et al., 2003). Scheifinger et al. (2007) weisen auf die Verschiebung von Eintrittsphasen phänologischer Planzenphasen in einem sich ändernden Klima hin. Die Abbildung 4.18 zeigt die Ergebnisse für die Phase „Flieder – erste Blüte". Die Szenarien (A1B und B1) sind aus hinunterskalierten globalen Klimaänderungsszenarien abgeleitet. Die Resultate zeigen eine deutliche Verschiebung zu früheren Eintrittszeitpunkten.

Eine sehr aufwendige Aufbereitung von Klimaszenarien geschieht im derzeit laufenden Forschungsprojekt Serac-CC. In diesem Forschungsprojekt wird die Auswirkung des Klimawandels auf drei kleine alpine Einzugsgebiete untersucht, die in unterschiedlichen Seehöhenstufen liegen. Die Herausforderungen für die Aufbereitung der meteorologischen Kenngrößen liegen einerseits bei der notwendigen räumlichen Auflösung, andererseits in der hohen zeitlichen Auflösung (15 min. Eingabedaten für die hydrologische Modellierung) dar. Die Fehlerkorrektur und Lokalisierung erfolgt mittels Quantile mapping und die Lokalisierung auf 1×1 km^2 erfolgt mittels INCA-Daten und der in Abschnitt 4.4.3 beschriebenen Methodik.

Für die zeitliche Diskretisierung wurden teilweise eigene Ansätze entwickelt (Goler und Formayer, 2012). Dies ist vor allem für eine sinnvolle zeitliche Disaggregierung des Niederschlags notwendig, da natürlich die Niederschlagsintensität ein wesentlicher Faktor für das Abflussverhalten derart kleiner Einzugsgebiete ist. Neben der reinen statistischen Aufbereitung der Eingabedaten für die hydrologische Modellierung wird aber auch mittels synoptischer Methoden die Belastbarkeit der Klimaszenarien hinsichtlich konvektiver Prozesse in diesen Gebieten untersucht.

Für das EU FP7-Projekt ACQWA wurden auf Basis der ENSEMBLES-Simulationen maßgeschneiderte Klimaszenarien als Input für eine Reihe von hydrologischen Impaktstudien erzeugt.

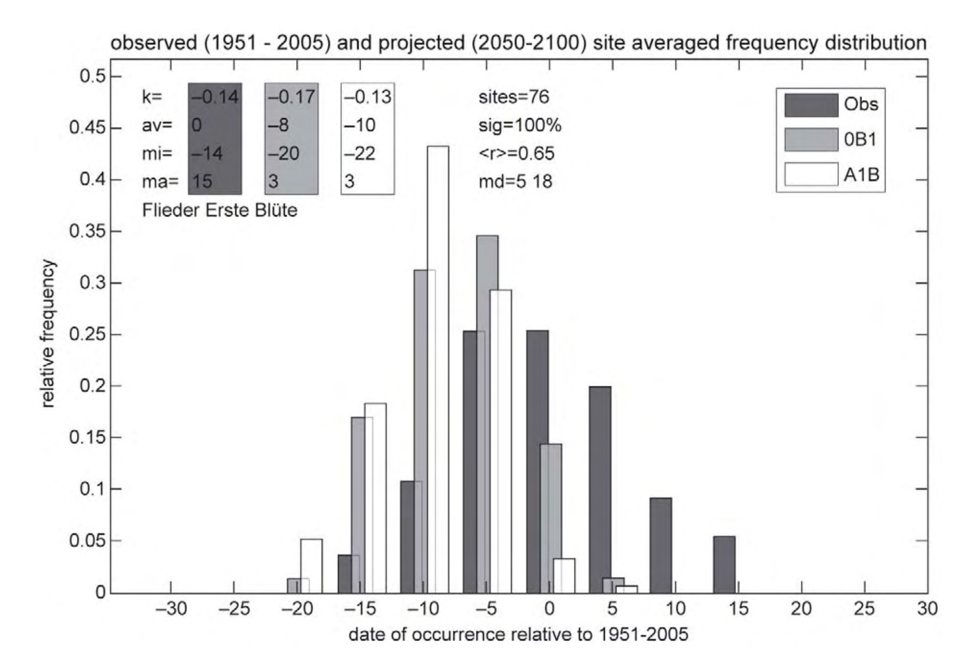


Abbildung 4.18 Verteilung der Eintrittstermine der ersten Blüte des Flieders in Österreich. Die Vorverschiebung der Eintrittstermine ist beim A1B-Emissions-Szenario stärker ausgeprägt als beim B1-Szenario. Quelle: Mattula et al. (2003)

Figure 4.18 Frequency of the first flowering dates of lilacs in Austria. The shift in the date of first flowering is stronger in the A1B scenario than in the B1 scenario. Source: Mattula et al. (2003)

Obwohl der ENSEMBLES-Datensatz zur Zeit des AC-QWA-Projekts der beste verfügbare Datensatz regionaler Klimaszenarien war, enthält er doch beachtliche Modellfehler, die eine direkte Anwendung in Impaktstudien unmöglich machen. Der gesamte ENSEMBLES-Datensatz wurde daher mithilfe einer Quantilen-basierten Transfermethode nachbearbeitet (quantile mapping (QM), Themeßl et al., 2011a; 2011b) um Fehler sowohl im Mittelwert als auch in der Form der Verteilung sowie im Jahresgang als auch im räumlichen Muster zu verringern. QM wurde nicht nur auf die üblichen Variablen Temperatur und Niederschlag angewendet, sondern auf Stationsbasis sehr erfolgreich auch auf Globalstrahlung, relative Feuchte und Windgeschwindigkeit (Wilcke et al., 2013). Dieser Datensatz bildet die Grundlage für eine Vielzahl von Studien über die Auswirkungen des Klimawandels im Alpenraum, etwa auf Wasserkraft, Gletscher, Naturgefahren und andere.

4.5 Forschungsbedarf
4.5 Research needs

4.5.1 Forschungsbedarf zu regionaler Klimamodellierung

In der regionalen Klimamodellierung zielt die Forschung im Wesentlichen auf Verbesserungen im methodischen Bereich ab. Getrieben durch die steigenden Anforderungen der Klimafolgenforschung sollen beispielsweise korrekte räumliche und zeitliche Verteilungen einzelner Klimaelemente sowie eine verbesserte physikalische Konsistenz der Klimaelemente untereinander erreicht werden (vgl. Maraun et al., 2010). Das bedeutet, es werden Weiterentwicklungen im Bereich des dynamischen und des statistischen Downscalings, sowie deren Kombination benötigt. Eine Voraussetzung dafür ist das Verständnis der Wechselwirkungen der verschiedenen Prozesse im Klimasystem „Erde" (vgl. Rial et al., 2004).

Im Bereich des dynamischen Downscalings konnten bereits erste Verbesserungen durch eine Erhöhung der Auflösung im Alpenraum unter ~4 km Gitterpunktabstand (und damit eine verbesserte Abbildung der Topographie) erzielt werden. Hohenegger et al. (2008) und Meissner et al. (2009) konnten zeigen, dass dadurch verbesserte Temperaturverteilungen und realistischere Niederschlagsereignisse im Sommer abgebildet werden können. Darüber hinaus konnten Prein et al. (2013) und Suklitsch et al. (2011) zeigen, dass Tagesgänge von konvektiven Niederschlägen (Startzeitpunkt und Maximum), kleinräumige extreme Niederschlagsraten, die räumliche Verteilung von Niederschlag auf Stundenbasis und die Erstreckung und Form von Niederschlagsereignissen verbessert werden. Allerdings ist diese Erhöhung der Auflösung aus mehreren Gründen nicht trivial, da

- die regionalen Klimamodelle ursprünglich für geringere Auflösungen konzipiert wurden, ihre Parametrisierungen müssen daher überarbeitet werden (vgl. Leung et al., 2003),

- hoch aufgelöste Information zur Charakterisierung der Erdoberfläche, die zum Betrieb der Modelle benötigt wird, gegenwärtig z. T. noch nicht befriedigend vorhanden ist, gewinnt aber zunehmend an Bedeutung (Brunsell et al., 2011),
- Beobachtungsdaten zur Modellevaluation, die das komplette Spektrum der natürlichen räumlichen und zeitlichen Variabilität umfassen, existieren oft nur in Ausnahmefällen existieren, was die Suche nach alternativen Referenzdaten erforderlich macht (z. B. den Einsatz von Nowcasting-Systemen) (Prein und Gobiet, 2011; Prein et al., 2013) und
- die technischen Ressourcen ausgebaut werden müssen.

Zusätzlich steht die Implementierung und Evaluation von weiteren Sub-Modellen / Modellkopplungen (z. B. von dynamischen Vegetationsmodellen, biogeochemischen Stoffkreisläufen, regionalen Ozeanmodellen, usw.) im Vordergrund.

Im Bereich des empirisch / statistischen Downscalings ist ein Vergleich verschiedener methodischer Zugänge zur Beantwortung unterschiedlicher sozio-ökonomischer Fragestellungen (wie etwa der künftigen Entwicklung von Extremniederschlägen) im Forschungsfokus, d.h. die Entwicklung von geeigneten Validierungsverfahren, welche die abgebildete Variabilität von relevanten Klimaelementen auf Zeitskalen von Stunden bis hin zu Dekaden sowie im Raum bewerten. Ebenso sollen diese Verfahren die simulierten Beziehungen der Klimaelemente untereinander auf ihre Tauglichkeit evaluieren. Die Weiterentwicklung empirischer Downscaling-Verfahren zur Erzeugung bisher noch nicht beobachteter Extremereignisse und die Generierung raum-zeitlich hoch aufgelöster Beobachtungsfelder (z. B. stündliche Gitterfelder mit 100 x 100 m^2) ist notwendig.

Diese Schwerpunkte sind die Voraussetzungen zur Erzeugung von robusten Klimaänderungsszenarien.

4.5.2 Forschungsbedarf zur Interaktion mit der Klimafolgenforschung

Alle statistischen Methoden zur Nachbearbeitung von Klimaszenarien beinhalten auch negative Effekte, daher muss das langfristige Ziel sein, die Qualität der Klimamodelle so zu erhöhen, dass keine Fehlerkorrektur mehr notwendig ist. Nur in den Modellen werden die Prozesse direkt untersucht und werden auch Rückkopplungseffekte berücksichtigt. Österreich ist zwar nicht direkt an der globalen Klimamodellierung beteiligt, dennoch ist es wichtig, dass hier österreichisches Know-how einfließt. Sei es durch Einbringung von Beobachtungsdaten zur Modellevaluierung oder durch Rückmeldung, welche Probleme die Globalmodelle im Alpenraum zeigen.

Die regionale Klimamodellierung wird in Österreich sehr aktiv betrieben. Hier geht es speziell um eine bessere Abbildung jener Prozesse, die im Alpenraum relevant sind. Langfristig muss neben einer weiteren Verfeinerung der räumlichen Auflösung auch an der Integrierung weiterer Prozesse (konvektionsauflösende Modelle, Rückkopplungseffekte mit Biosphäre, Chemiemodellierung, etc.) gearbeitet werden.

Basis für alle statistischen Methoden sind belastbare, räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Beobachtungsdatensätze. Der Histalp-Datensatz der ZAMG kann hier als gutes Beispiel dienen, in welche Richtung die Entwicklung gehen muss. Gerasterte Beobachtungsdatensätze, basierend auf qualitätsgeprüften Beobachtungsdaten, die in hinreichender Dichte vorhanden sind, um die räumliche Variabilität im Alpenraum abzudecken, sind die Basis für die historische Untersuchung des Klimas und seiner Auswirkungen, aber auch für die Aufbereitung von Klimaszenarien. Hier ist auch internationale Kooperation notwendig, damit länderübergreifende Datensätze zur Verfügung stehen.

Natürlich muss auch an der Weiterentwicklung der statistischen Methoden der Datennachbereitung weiter geforscht werden. Folgende Ziele stehen hier im Vordergrund:

- Die Erhaltung der physikalischen Konsistenz zwischen den Parametern.
- Die Erhaltung der räumlich / zeitlichen Strukturen der meteorologischen Felder.
- Eine bessere Repräsentation von Extremen.

Neben der rein statistischen Bearbeitung der Modellergebnisse ist es weiterhin unerlässlich, sich mit der Repräsentation relevanter Prozesse in den Modellen zu beschäftigen. Wichtig ist hierbei die Entwicklung von Methoden, „soft knowledge“ über die Qualität der Prozessabbildung in den Modellen, bei der Interpretation von Klimaszenarien und daraus abgeleiteten Folgenforschungsaussagen nutzbar zu machen.

Die Schnittstelle Klima- / Klimafolgenforschung ist von signifikanter Relevanz. Die Forschung, die Anleitungen, wie man sich auf mögliche Veränderungen der Umwelt einstellen kann, bieten kann, ist voranzutreiben (Wald, Gewässer, Tourismus, Infrastruktur, etc.), wobei ein wesentlicher Faktor sein wird, die interdisziplinäre Zusammenarbeit weiterhin zu fördern und auszubauen.

4.6 Literaturverzeichnis
4.6 References

Ahrens, B., 2003. Rainfall downscaling in an alpine watershed applying a multiresolution approach. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 108, 8388. doi:10.1029/2001JD001485

Ahrens, B., Beck, A., 2008. On upscaling of rain-gauge data for evaluating numerical weather forecasts. Meteorology and Atmospheric Physics 99, 155–167. doi:10.1007/s00703-007-0261-8

Albrecht, F.M., Dietzer, B., 2006a. Langzeitverhalten der Starkniederschläge in Baden-Württemberg und Bayern: KLIWA-Projekt A 1.1.3 "Trenduntersuchungen extremer Niederschlagsereignisse in Baden-Württemberg und Bayern". Dt. Wetterdienst, Abt. Hydrometeorologie, Offenbach.

Albrecht, F.M., Dietzer, B., 2006b. Langzeitverhalten der Starkniederschläge in Baden-Württemberg und Bayern: KLIWA-Projekt A 1.1.3 "Trenduntersuchungen extremer Niederschlagsereignisse in Baden-Württemberg und Bayern". Dt. Wetterdienst, Abt. Hydrometeorologie, Offenbach.

Alexandersson, H., Tuomenvirta, H., Schmith, T., Iden, K., 2000. Trends of storms in NW Europe derived from an updated pressure data set., Climate Research 14.

Auer, I., Böhm, R., Jurkovic, A., Lipa, W., Orlik, A., Potzmann, R., Schöner, W., Ungersböck, M., Matulla, C., Briffa, K., Jones, P., Efthymiadis, D., Brunetti, M., Nanni, T., Maugeri, M., Mercalli, L., Mestre, O., Moisselin, J.-M., Begert, M., Müller-Westermeier, G., Kveton, V., Bochnicek, O., Stastny, P., Lapin, M., Szalai, S., Szentimrey, T., Cegnar, T., Dolinar, M., Gajic-Capka, M., Zaninovic, K., Majstorovic, Z., Nieplova, E., 2007. HISTALP—historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region. International Journal of Climatology 27, 17–46. doi:10.1002/joc.1377

Auer, I., Böhm, R., Schöner, W., 2001. ALOCLIM-Austrian Long-term Climate 1767-2000.Multiple Instrumental Climate time series from Central Europe. (No. 395), Österreichische Beiträge zu Meteorologie und Geophysik. Heft 25. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien.

Bárdossy, A., Duckstein, L., Bogardi, I., 1995. Fuzzy rule-based classification of atmospheric circulation patterns. International Journal of Climatology 15, 1087–1097. doi:10.1002/joc.3370151003

Barnett, D.N., Brown, S.J., Murphy, J.M., Sexton, D.M.H., Webb, M.J., 2006. Quantifying uncertainty in changes in extreme event frequency in response to doubled CO2 using a large ensemble of GCM simulations. Clim Dyn 26, 489–511. doi:10.1007/s00382-005-0097-1

Bärring, L., von Storch, H., 2004. Scandinavian storminess since about 1800. Geophysical Research Letters 31. doi:10.1029/2004GL020441

Beck, A., 2004. Impact of nesting strategies in dynamical downscaling of reanalysis data. Geophysical Research Letters 31. doi:10.1029/2004GL020115

Belleflamme, A., Fettweis, X., Erpicum, M., 2011. Evaluation of the present and future general circulation over Greenland simulated by the IPCC AR5/CMIP5 GCMs with the help of a circulation type classification. EGU2011-1206, European Geosciences Union General Assembly 2011.

Benestad, R.E., Hygen, H.O., van Dorland, R., Cook, J., Nuccitelli, D., 2013. Agnotology: learning from mistakes. Earth System Dynamics 4, 451–505. doi:10.5194/esdd-4-451-2013

Benestad, R.E., 2007. Novel methods for inferring future changes in extreme rainfall over Northern Europe. Clim Res 34, 195–210. doi:10.3354/cr00693

Beniston, M., Stephenson, D.B., Christensen, O.B., Ferro, C.A.T., Frei, C., Goyette, S., Halsnaes, K., Holt, T., Jylhä, K., Koffi, B., Palutikof, J., Schöll, R., Semmler, T., Woth, K., 2007. Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. Climatic Change 81, 71–95. doi:10.1007/s10584-006-9226-z

Blenkinsop, S., Fowler, H.J., 2007. Changes in European drought characteristics projected by the PRUDENCE regional climate models. International Journal of Climatology 27, 1595–1610. doi:10.1002/joc.1538

Böhm, R., Auer, I., Brunetti, M., Maugeri, M., Nanni, T., Schöner, W., 2001. Regional temperature variability in the European Alps: 1760–1998 from homogenized instrumental time series. Int. J. Climatol. 21, 1779–1801. doi:10.1002/joc.689

Böhm, U., Kücken, M., Ahrens, W., Block, A., Hauffe, D., Keuler, K., Rockel, B., Will, A., 2006. CLM-the Climate Version of LM: Brief Description and Long-Term Applications. COSMO Newsletter 6, 225–235.

Bretherton, C.S., Smith, C., Wallace, J.M., 1992. An intercomparison of methods for finding coupled patterns in climate data. Journal of Climate 5, 541–560. doi:10.1175/1520-0442(1992)005<0541:AIOMFF>2.0.CO;2

Brunsell, N.A., Mechem, D.B., Anderson, M.C., 2011. Surface heterogeneity impacts on boundary layer dynamics via energy balance partitioning. Atmospheric Chemistry and Physics 11, 3403–3416. doi:10.5194/acp-11-3403-2011

Buser, C., Künsch, H., Schär, C., 2010. Bayesian multi-model projections of climate: generalization and application to ENSEMBLES results. Climate Research 44, 227–241. doi:10.3354/cr00895

Busuioc, A., von Storch, H., 1996. Changes in the winter precipitation in Romania and its relation to the large-scale circulation. Tellus 48A, 538–552.

Calanca, P., 2007. Climate change and drought occurrence in the Alpine region: How severe are becoming the extremes? Global and Planetary Change 57, 151–160. doi:10.1016/j.gloplacha.2006.11.001

Casado, M.J., Pastor, M.A., 2011. How well do IPCC AR4 models simulate circulation types? EGU2011-1206, European Geosciences Union General Assembly 2011.

Cattiaux, J., Douville, H., Peings, Y., 2013. European temperatures in CMIP5: origins of present-day biases and future uncertainties. Clim Dyn 41, 2889–2907. doi:10.1007/s00382-013-1731-y

Charles, S.P., Bates, B.C., Hughes, J.P., 1999. A spatiotemporal model for downscaling precipitation occurrence and amounts. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012) 104, 31657–31669. doi:10.1029/1999JD900119

Chen, J.-H., Lin, S.-J., 2011. The remarkable predictability of interannual variability of Atlantic hurricanes during the past decade. Geophysical Research Letters 38. doi:10.1029/2011GL047629

Christensen, J.H., Christensen, O.B., Lopez, P., van Meijgaard, E., Botzet, M., 1996. The HIRHAM 4 regional atmospheric climate model (Scientific Report No. 96-4). Danish Meteorological Institute (DMI), Copenhagen.

Christensen, O.B., Christensen, J.H., Machenhauer, B., Botzet, M., 1998. Very high-resolution regional climate simulations over Scandinavia-Present climate. Journal of Climate 11, 3204–3229. doi:10.1175/1520-0442(1998)011<3204:VHRRCS>2.0.CO;2

Christensen, J.H., Christensen, O.B., 2007. A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century. Climatic Change 81, 7–30. doi:10.1007/s10584-006-9210-7

Christensen, J.H., Hewiston, B., Busuioc, A., Chen, A., Gao, X., Held, I., Jones, R., Kolli, R.K., Kwon, W.-T., Laprise, R., Magaña Rueda, V., Mearns, L., Menéndez, C.G., Räisänen, A., Rinke, A., Sarr, A., Whetton, P., 2007. Regional Climate Projections, in: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, M., Tignor, M., Miller, H.L. (Eds.), Climate Change 2007 - The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Cliamte Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Clark, R.T., Brown, S.J., Murphy, J.M., 2006. Modeling Northern Hemisphere Summer Heat Extreme Changes and Their Uncertainties Using a Physics Ensemble of Climate Sensitivity Experiments. Journal of Climate 19, 4418–4435. doi:10.1175/JCLI3877.1

Dankers, R., Hiederer, R., 2008. Extreme temperatures and precipitation in Europe: analysis of a high-resolution climate change scenario (JRC Scientific and Technical Reports No. EUR 23291 EN / No. 52).

Debele, B., Srinivasan, R., Yves Parlange, J., 2007. Accuracy evaluation of weather data generation and disaggregation methods at finer timescales. Advances in Water Resources 30, 1286–1300. doi:10.1016/j.advwatres.2006.11.009

Della-Marta, P.M., Haylock, M.R., Luterbacher, J., Wanner, H., 2007. Doubled length of western European summer heat waves since 1880. Journal of Geophysical Research 112. doi:10.1029/2007JD008510

Déqué, M., Dreveton, C., Braun, A., Cariolle, D., 1994. The ARPEGE/IFS atmosphere model: a contribution to the French community climate modelling. Climate Dynamics 10, 249–266. doi:10.1007/BF00208992

Déqué, M., 2007. Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values. Global and Planetary Change 57, 16–26. doi:10.1016/j.gloplacha.2006.11.030

Déqué, M., Rowell, D.P., Lüthi, D., Giorgi, F., Christensen, J.H., Rockel, B., Jacob, D., Kjellström, E., Castro, M., Hurk, B., 2007. An intercomparison of regional climate simulations for Europe: assessing uncertainties in model projections. Climatic Change 81, 53–70. doi:10.1007/s10584-006-9228-x

Déqué, M., Somot, S., Sanchez-Gomez, E., Goodess, C.M., Jacob, D., Lenderink, G., Christensen, O.B., 2012. The spread amongst ENSEMBLES regional scenarios: regional climate models, driving general circulation models and interannual variability. Climate Dynamics 38, 951–964. doi:10.1007/s00382-011-1053-x

Deser, C., Phillips, A., Bourdette, V., Teng, H., 2012. Uncertainty in climate change projections: the role of internal variability. Climate Dynamics 38, 527–546. doi:10.1007/s00382-010-0977-x

Dethloff, K., Rinke, A., Lehmann, R., Christensen, J.H., Botzet, M., Machenhauer, B., 1996. Regional climate model of the Arctic atmosphere. Journal of Geophysical Research 101, 23401–23422. doi:10.1029/96JD02016

Deutscher Wetterdienst - DWD, n.d. URL http://www.dwd.de/

Dickinson, R.E., Errico, R.M., Giorgi, F., Bates, G.T., 1989. A regional climate model for the western United States. Climatic Change 15, 383–422.

Dobler, A., Ahrens, B., 2008. Precipitation by a regional climate model and bias correction in Europe and South Asia. Meteorologische Zeitschrift 17, 499–509. doi:10.1127/0941-2948/2008/0306

Dobler, A., Ahrens, B., 2011. Four climate change scenarios for the Indian summer monsoon by the regional climate model COSMO-CLM. Journal of Geophysical Research 116. doi:10.1029/2011JD016329

Donat, M.G., 2010. European wind storms, related loss potentials and changes in multi-model climate simulations (Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Naturwissenschaften). Fachbereich für Geowissenschaften der Freien Universität Berlin, Berlin.

Douville, H., Chauvin, F., Planton, S., Royer, J.-F., Salas-Mélia, D., Tyteca, S., 2002. Sensitivity of the hydrological cycle to increasing amounts of greenhouse gases and aerosols. Climate Dynamics 20, 45–68. doi:10.1007/s00382-002-0259-3

Faggian, P., Giorgi, F., 2009. An analysis of global model projections over Italy, with particular attention to the Italian Greater Alpine Region (GAR). Climatic Change 96, 239–258. doi:10.1007/s10584-009-9584-4

Farda, A., Déué, M., Somot, S., Horányi, A., Spiridonov, V., Tóth, H., 2010. Model ALADIN as regional climate model for Central and Eastern Europe. Studia Geophysica et geodaetica 54, 313–332. doi:10.1007/s11200-010-0017-7

Fischer, E.M., Schär, C., 2010. Consistent geographical patterns of changes in high-impact European heatwaves. Nature Geoscience 3, 398–403. doi:10.1038/ngeo866

Formayer, H., Matulla, C., Haas, P., Groll, N., 2003. StartClim.5: Diagnose von Extremereignissen aus großräumigen meteorologischen Feldern, in: StartClim.2003: Startprojekt Klimaschutz. Erste Analysen Extremer Wetterereignisse Und Ihrer Auswirkungen in Österreich. Endbericht. Wien, pp. 29–32.

Formayer, H., Haas, P., Hofstätter, M., Radanovics, S., Kromp-Kolb, H., 2007. Räumlich und zeitlich hochaufgelöste Temperaturszenarien für Wien und ausgewählte Analysen bezüglich Adaptionsstrategien (Endbericht einer Studie im Auftrag der Wiener Umweltschutzabteilung - MA 22 der Stadt Wien gemeinsam mit der MA 27 - EU-Strategie und Wirtschaftsentwicklung.). Institut für Meteorologie, Universität für Bodenkultur, Wien.

Formayer, H., 2011a. Aufbereitung von Klimaszenarien für die Klimafolgenforschung, in: Tagungsband Des 4. Österreichischen MeteorologInnentag. Presented at the 4. Österreichischer MeteorologInnentag, Klagenfurt am Wörthersee.

Formayer, H., Gerersdorfer, T., Seibert, P., Loibl, I., Peters-Anders, J., Züger, J., Prettenthaler, F., Töglhofer, C., Themeßl, M., Gobiet, A., Truhez, H., Schleidt, K., Waitz-Vetter von der Lilie, W., Kroiss, F., Anders, I., Jurkovic, A., Kaindl, G., 2011b. KlimDAtZ-Concept for an „Austrian Climate Data Centre“ (Zitierbarer Endbericht des gleichnamigen ACRP Forschungsprojektes AC0K00016).

Formayer, H., Haas, P., 2009. Correction of RegCM3 model output data using a rank matching approach applied on various meteorological parameters, in: CECILIA Deliverable 3.2: RCM Output Localization Methods.

Franzke, C., Woollings, T., 2011. On the Persistence and Predictability Properties of North Atlantic Climate Variability. Journal of Climate 24, 466–472. doi:10.1175/2010JCLI3739.1

Frei, C., Schär, C., 1998. A precipitation climatology of the Alps from high-resolution rain-gauge observations. International

Journal of Climatology 18, 873–900. doi:10.1002/(SICI)1097-0088(19980630)18:8<873::AID-JOC255>3.0.CO;2-9

Frei, C., Schär, C., 2001. Detection probability of trends in rare events: Theory and application to heavy precipitation in the Alpine region. Journal of Climate 14, 1568–1584.

Frei, C., Christensen, J.H., Déqué, M., Jacob, D., Jones, R.G., Vidale, P.L., 2003. Daily precipitation statistics in regional climate models: Evaluation and intercomparison for the European Alps. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012) 108. doi:10.1029/2002JD002287

Frei, C., Schöll, R., Fukutome, S., Schmidli, J., Vidale, P.L., 2006. Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models. Journal of Geophysical Research 111. doi:10.1029/2005JD005965

Frey-Buness, F., Heimann, D., Sausen, R., 1995. A statistical-dynamical downscaling procedure for global climate simulations. Theoretical and Applied Climatology 50, 117–131. doi:10.1007/BF00866111

Fricke, W., Kaminski, U., 2002. Ist die Zunahme von Starkniederschlägen auf veränderte Wetterlagen zurückzuführen?, GAW Brief des Deutschen Wetterdienstes Nr 12.

Fuentes, U., Heimann, D., 2000. An Improved Statistical-Dynamical Downscaling Scheme and its Application to the Alpine Precipitation Climatology. Theoretical and Applied Climatology 65, 119–135. doi:10.1007/s007040070038

Furrer, E.M., Katz, R.W., 2007. Generalized linear modeling approach to stochastic weather generators. Climate Research 34, 129–144. doi:10.3354/cr034129

Gerersdorfer, T., Formayer, H., Moshammer, H., Frank, A., Haas, P., Leitner, B., 2006. Untersuchung zur nächtlichen Abkühlung in einem sich ändernden Klima (Endbericht zum Projekt StartClim2005.A1b, Teilprojekt von StartClim2005 „Klimawandel und Gesundheit“ No. StartClim2005.A1b). Institut für Meteorologie Universität für Bodenkultur, Medizinische Universität Wien, ZPH Institut für Umwelthygiene, Wien.

Giorgi, F., Bates, G.T., 1989. The Climatological Skill of a Regional Model over Complex Terrain. Monthly Weather Review 117, 2325–2347. doi:10.1175/1520-0493(1989)117<2325:TCSOAR>2.0.CO;2

Giorgi, F., 1990. Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. Journal of Climate 3, 941–963. doi:10.1175/1520-0442(1990)003<0941:SORCUA>2.0.CO;2

Giorgi, F., Mearns, L.O., 1991. Approaches to the simulation of regional climate change: a review. Reviews of Geophysics 29, 191–216. doi:10.1029/90RG02636

Giorgi, F., Bi, X., 2005. Regional changes in surface climate interannual variability for the 21st century from ensembles of global model simulations. Geophysical Research Letters 32. doi:10.1029/2005GL023002

Giorgi, F., Coppola, E., 2007. European climate-change oscillation (ECO). Geophysical Research Letters 34. doi:10.1029/2007GL031223

Gobiet, A., Kotlarski, S., Beniston, M., Heinrich, G., Rajczak, J., Stoffel, M., 2014. 21st century climate change in the European Alps—A review. Science of The Total Environment. doi:10.1016/j.scitotenv.2013.07.050

Goler, R.A., Formayer, H., 2012. Temporal disaggregation of daily meteorological data to 15-minute intervals for use in hydrological models.

Good, P., Lowe, J., 2006. Emergent behavior and uncertainty in multimodel climate projections of precipitation trends at small spatial scales. Journal of climate 19, 5554–5569. doi:10.1175/JCLI3932.1

Gregory, J.M., Mitchell, J.F.B., Brady, A.J., 1997. Summer drought in northern midlatitudes in a time-dependent CO2 climate experiment. Journal of Climate 10, 662–686. doi:10.1175/1520-0442(1997)010<0662:SDINMI>2.0.CO;2

Groisman, P.Y., Karl, T.R., Easterling, D.R., Knight, R.W., Jamason, P.F., Hennessy, K.J., Suppiah, R., Page, C.M., Wibig, J., Fortuniak, K., 1999. Changes in the probability of heavy precipitation: important indicators of climatic change. Climatic Change 42, 243–283.

Großmann, C., Roos, H.-G., 2005. Numerische Behandlung partieller Differentialgleichungen. Teubner Studienbücher Mathematik, Wiesbaden.

Gyalistras, D., von Storch, H., Fischlin, A., Bensiton, M., 1994. Storch H von, Fischlin A, Beniston M (1994) Linking GCM-simulated climatic changes to ecosystem models: case studies of statistical downscaling in the Alps. Climate Research 4, 167–189.

Haiden, T., Kann, A., Pistotnik, G., Stadlbacher, K., Wittmann, C., 2010. Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis (INCA) System description. Central Institute for Meteorology and Geodynamics, Vienna, Austria.

Hantel, M., Maurer, C., 2011. The median winter snowline in the Alps. Meteorologische Zeitschrift 20, 267–276. doi:10.1127/0941-2948/2011/0495

Haslinger, K., Anders, I., Hofstätter, M., 2013. Regional climate modelling over complex terrain: an evaluation study of COSMO-CLM hindcast model runs for the Greater Alpine Region. Clim Dyn 40, 511–529. doi:10.1007/s00382-012-1452-7

Haude, W., 1955. Zur Bestimmung der Verdunstung auf möglichst einfache Weise. Deutscher Wetterdienst, Bad Kissingen.

Hawkins, E., Sutton, R., 2009. The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions. Bulletin of the American Meteorological Society 90, 1095–1107. doi:10.1175/2009BAMS2607.1

Hawkins, E., Sutton, R., 2011. The potential to narrow uncertainty in projections of regional precipitation change. Climate Dynamics 37, 407–418. doi:10.1007/s00382-010-0810-6

Haylock, M.R., Hofstra, N., Klein Tank, A.M.G., Klok, E.J., Jones, P.D., New, M., 2008. A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 113. doi:10.1029/2008JD010201

Hechtel, L.M., Stul, R.B., Moeng, C.-H., 1990. The Effects of Nonhomogeneous Surface Fluxes on the Convective Boundary Layer: A Case Study Using Large-Eddy Simulation. Journal of the Atmospheric Sciences 47, 1721–1741. doi:10.1175/1520-0469(1990)047<1721:TEONSF>2.0.CO;2

Hegerl, G.C., Zwiers, F.W., Stott, P.A., Kharin, V.V., 2004. Detectability of anthropogenic changes in annual temperature and precipitation extremes. Journal of Climate 17, 3683–3700. doi:10.1175/1520-0442(2004)017<3683:DOACIA>2.0.CO;2

Heinrich, G., Gobiet, A., 2011. Expected Climate Change and its Uncertainty in the Alpine Region (No. WEGC Report to ACRP Nr. 02/2011). Wegener Center for Climate and Global Change, Graz, Austria.

Heinrich, G., Gobiet, A., Truhetz, H., 2012. recip:century2: Extended uncertainty analysis of the reclip:century ensemble (WEGC Report to ACRP No. Nr. 01/2012). Wegener Center for Climate and Global Change, University of Graz, Graz, Austria.

Heinrich, G., Gobiet, A., Truhetz, H., Mendlik, T., 2013. Expected Climate Change and its Uncertainty in the Alpine Region: Exten-

ded Uncertainty Assessment of the reclip:century and ENSEMBLES Multi-Model Dataset, Scientifc Report. Wegener Center Verlag, Graz, Austria.

Hewitson, B.C., Crane, R.G., 1992. Regional-scale climate prediction from the GISS GCM. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 97, 249–267. doi:10.1016/0031-0182(92)90212-N

Hewitson, B.C., Crane, R.G., 1996. Climate downscaling: techniques and application. Clim Res 7, 85–95. doi:10.3354/cr007085

Hiebl, J., Auer, I., Böhm, R., Schöner, W., Maugeri, M., Lentini, G., Spinoni, J., Brunetti, M., Nanni, T., Percec Tadíc, M., Bihari, Z., Dolinar, M., Müller-Westermeier, G., 2009. A high-resolution 1961–1990 monthly temperature climatology for the greater Alpine region.

Hiebl, J., Hofstätter, M., 2012. No increase in multi-day temperature variability in Austria following climate warming. Climatic Change 113, 733–750. doi:10.1007/s10584-011-0389-x

Hirschi, M., Seneviratne, S.I., Alexandrov, V., Boberg, F., Boroneant, C., Christensen, O.B., Formayer, H., Orlowsky, B., Stepanek, P., 2011. Observational evidence for soil-moisture impact on hot extremes in southeastern Europe. Nature Geosci 4, 17–21. doi:10.1038/ngeo1032

Hofstätter, M., Formayer, H., 2011. Modelierung der Schneedecke unter Berücksichtigung maschineller Beschneiung, in: Prettenthaler, F., Formayer, H. (Eds.), Tourismus Im Klimawandel: Zur Regionalwirtschaftlichen Bedeutung Des Klimawandels Für Die Österreichischen Tourismusgemeinden, Studien Zum Klimawandel in Österreich. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, pp. 41–47.

Hofstätter, M., Matulla, C., 2010. PRISK-CHANGE. Veränderung des Risikos extremer Niederschlagsereignisse als Folge des Klimawandels (Abschlussbericht der Fachabteilung Klimavariabilität / Modellierung in der Abteilung Klimaforschung).

Hohenegger, C., Brockhaus, P., Schär, C., 2008. Towards climate simulations at cloud-resolving scales. Meteorologische Zeitschrift 17, 383–394. doi:10.1127/0941-2948/2008/0303

Kyselý, J., 2004. Mortality and displaced mortality during heat waves in the Czech Republic. International journal of biometeorology 49, 91–97. doi:10.1007/s00484-004-0218-2

IPCC, 2007. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC, 2012. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaption. A special Report of Working groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.

IPCC, 2013a. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC, 2013b. Summary for Policymakers, in: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (Eds.), Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Isotta, F.A., Frei, C., Weilguni, V., Perčec Tadić, M., Lassègues, P., Rudolf, B., Pavan, V., Cacciamani, C., Antolini, G., Ratto, S.M., Munari, M., Micheletti, S., Bonati, V., Lussana, C., Ronchi, C., Panettieri, E., Marigo, G., Vertačnik, G., 2014. The climate of daily precipitation in the Alps: development and analysis of a high-resolution grid dataset from pan-Alpine rain-gauge data: CLIMATE OF DAILY PRECIPITATION IN THE ALPS. International Journal of Climatology 34, 1657–1675. doi:10.1002/joc.3794

Jacob, D., Podzun, R., 1997. Sensitivity studies with the regional climate model REMO. Meteorology and Atmospheric Physics 63, 119–129.

Jacob, D., Bärring, L., Christensen, O.B., Christensen, J.H., Castro, M., Déqué, M., Giorgi, F., Hagemann, S., Hirschi, M., Jones, R., Kjellström, E., Lenderink, G., Rockel, B., Sánchez, E., Schär, C., Seneviratne, S.I., Somot, S., Ulden, A., Hurk, B., 2007. An inter-comparison of regional climate models for Europe: model performance in present-day climate. Climatic Change 81, 31–52. doi:10.1007/s10584-006-9213-4

Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O.B., Bouwer, L.M., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., Kröner, N., Kotlarski, S., Kriegsmann, A., Martin, E., Meijgaard, E., Moseley, C., Pfeifer, S., Preuschmann, S., Radermacher, C., Radtke, K., Rechid, D., Rounsevell, M., Samuelsson, P., Somot, S., Soussana, J.-F., Teichmann, C., Valentini, R., Vautard, R., Weber, B., Yiou, P., 2014. EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. Regional Environmental Change 14, 563–578. doi:10.1007/s10113-013-0499-2

Jacobeit, J., Rathmann, J., Philipp, A., Jones, P.D., 2009. Central European precipitation and temperature extremes in relation to large-scale atmospheric circulation types. Meteorologische Zeitschrift 18, 397–410. doi:10.1127/0941-2948/2009/0390

Jaeger, E.B., Anders, I., Lüthi, D., Rockel, B., Schär, C., Seneviratne, S.I., 2008. Analysis of ERA40-driven CLM simulations for Europe. Meteorologische Zeitschrift 17, 349–367. doi:10.1127/0941-2948/2008/0301

Kapsch, M., 2011. Longterm variability of hail-related weather types in an ensemble of regional climate models (Diplomarbeit). Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Kapsch, M.-L., Kunz, M., Vitolo, R., Economou, T., 2012. Long-term trends of hail-related weather types in an ensemble of regional climate models using a Bayesian approach. Journal of Geophysical Research 117. doi:10.1029/2011JD017185

Katz, R.W., 1999. Extreme value theory for precipitation: sensitivity analysis for climate change. Advances in Water Resources 23, 133–139. doi:10.1016/S0309-1708(99)00017-2

Kendon, E.J., Rowell, D.P., Jones, R.G., 2009. Mechanisms and reliability of future projected changes in daily precipitation. Climate Dynamics 35, 489–509. doi:10.1007/s00382-009-0639-z

Kharin, V.V., Zwiers, F.W., 2005. Estimating extremes in transient climate change simulations. Journal of Climate 43.

Kharin, V.V., Zwiers, F.W., Zhang, X., Wehner, M., 2013. Changes in temperature and precipitation extremes in the CMIP5 ensemble. Climatic Change 119, 345–357. doi:10.1007/s10584-013-0705-8

Kjellström, E., Bärring, L., Jacob, D., Jones, R., Lenderink, G., Schär, C., 2007. Modelling daily temperature extremes: recent climate and future changes over Europe. Climatic Change 81, 249–265. doi:10.1007/s10584-006-9220-5

Knippertz, P., Ulbrich, U., Speth, P., 2000. Changing cyclones and surface wind speeds over the North-Atlantic and Europe in a transient GHG experiment. Climate Research 15, 109–122.

Knutti, R., Sedláček, J., 2013. Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. Nature Climate Change 3, 369–373. doi:10.1038/nclimate1716

Kothe, S., Dobler, A., Beck, A., Ahrens, B., 2011. The radiation budget in a regional climate model. Climate Dynamics 36, 1023–1036. doi:10.1007/s00382-009-0733-2

Kothe, S., Lüthi, D., Ahrens, B., 2013. Analysis of the West African Monsoon system in the regional climate model COSMO-CLM: ANALYSIS OF THE WEST AFRICAN MONSOON SYSTEM IN COSMO-CLM. International Journal of Climatology 34, 481–493. doi:10.1002/joc.3702

Kotlarski, S., Bosshard, T., Lüthi, D., Pall, P., Schär, C., 2012. Elevation gradients of European climate change in the regional climate model COSMO-CLM. Climatic change 112, 189–215. doi:10.1007/s10584-011-0195-5

Koutsoyiannis, D., Onof, C., Wheater, H.S., 2003. Multivariate rainfall disaggregation at a fine timescale. Water Resources Research 39. doi:10.1029/2002WR001600

Kromp-Kolb, H., Formayer, H., Haas, P., Hofstätter, M., Schwarzl, I., 2009. Beobachtete Veränderung der Hitzeperioden in Oberösterreich und Abschätzung der möglichen zukünftigen Entwicklungen. Band 1 der Forschungsreihe „Auswirkungen des Klimawandels auf Oberösterreich" im Auftrag des Umweltlandesrates Rudi Anschober, Land Oberösterreich (BOKU-Met Report No. 12). Inst. für Meteorologie (BOKU-Met), Universität für Bodenkultur Wien, Wien.

Leckebusch, G.C., Ulbrich, U., 2004. On the relationship between cyclones and extreme windstorm events over Europe under climate change. Global and Planetary Change, Extreme climatic events 44, 181–193. doi:10.1016/j.gloplacha.2004.06.011

Leckebusch, G.C., Ulbrich, U., Fröhlich, L., Pinto, J.G., 2007. Property loss potentials for European midlatitude storms in a changing climate. Geophysical Research Letters 34. doi:10.1029/2006GL027663

Lenderink, G., Ulden, A., Hurk, B., Meijgaard, E., 2007. Summertime inter-annual temperature variability in an ensemble of regional model simulations: analysis of the surface energy budget. Climatic Change 81, 233–247. doi:10.1007/s10584-006-9229-9

Lenderink, G., van Meijgaard, E., 2008. Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes. Nature Geoscience 1, 511–514. doi:10.1038/ngeo262

Leung, L.R., Mearns, L.O., Giorgi, F., Wilby, R.L., 2003. Regional Climate Research: Needs and Opportunities. Bulletin of the American Meteorological Society 84, 89–95. doi:10.1175/BAMS-84-1-89

Lexer, M.J., Honninger, K., Scheifinger, H., Matulla, C., Groll, N., Kromp-Kolb, H., 2000. The sensitivity of central European mountain forests to scenarios of climatic change: methodological frame for a large-scale risk assessment. Silva Fennica 34, 113–129.

Lexer, M.J., Hönninger, K., Scheifinger, H., Matulla, C., Groll, N., Kromp-Kolb, H., Schadauer, K., Starlinger, F., Englisch, M., 2001. The sensitivity of Austrian forests to scenarios of climatic change: a large-scale risk assessment based on a modified gap model and forest inventory data, Monographien. Umweltbundesamt, Wien.

Loibl, W., Formayer, H., Schöner, W., Truhetz, H., Anders, I., Gobiet, A., Heinrich, G., Köstl, M., Nadeem, I., Peters-Anders, J., Schicker, I., Suklitsch, M., Züger, H., Juli 2011a. reclip:century 1: Models, Data and GHG-Scenarios, Simulations (Final Report ACRP Project Number: A760437). AIT Austrian Institute of Technology, Wien.

Loibl, W., Peters-Anders, J., Züger, J., 2011b. AP2 Teilbericht. Datenbedarf nach Nutzergruppen – Ergebnisse einer Erhebung Diskussion von Hard- und Softwareerfordernissen, Teilbericht Partner 1., in: Formayer, H., Gerersdorfer, T., Seibert, P., Loibl, I., Peters-Anders, J., Züger, J., Prettenthaler, F., Töglhofer, C., Themeßl, M., Gobiet, A., Truhez, H., Schleidt, K., Waitz-Vetter von der Lilie, W., Kroiss, F., Anders, I., Jurkovic, A., Kaindl, G. (Eds.), Concept for an „Austrian Climate Data Centre". p. Anhang–1–39.

Mahoney, K., Alexander, M.A., Thompson, G., Barsugli, J.J., Scott, J.D., 2012. Changes in hail and flood risk in high-resolution simulations over Colorado's mountains. Nature Climate Change 2, 125–131. doi:10.1038/nclimate1344

Maraun, D., Wetterhall, F., Ireson, A.M., Chandler, R.E., Kendon, E.J., Widmann, M., Brienen, S., Rust, H.W., Sauter, T., Themeßl, M., Venema, V.K.C., Chun, K.P., Goodess, C.M., Jones, R.G., Onof, C., Vrac, M., Thiele-Eich, I., 2010. Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. Reviews of Geophysics 48. doi:10.1029/2009RG000314

Mariotti, A., Zeng, N., Yoon, J.-H., Artale, V., Navarra, A., Alpert, P., Li, L.Z.X., 2008. Mediterranean water cycle changes: transition to drier 21st century conditions in observations and CMIP3 simulations. Environmental Research Letters 3, 044001. doi:10.1088/1748-9326/3/4/044001

Matulla, C., Groll, N., Kromp-Kolb, H., Scheifinger, H., Lexer, M.J., Widmann, M., 2002. Climate change scenarios at Austrian National Forest Inventory sites. Climate Research 22, 161–173.

Matulla, C., Haas, P., 2003. Prädiktorsensitives Downscaling gekoppelt mit Wettergeneratoren: saisonale und tägliche CC-Szenarien in komplex strukturiertem Gelände (No. GKSS Report 2003/24). GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH, Geesthacht.

Matulla, C., Scheifinger, H., Menzel, A., Koch, E., 2003. Exploring two methods for statistical downscaling of Central European phenological time series. International Journal of Biometeorology 48, 56–64. doi:10.1007/s00484-003-0186-y

Matulla, C., 2005. Predictor-sensitive empirical downscaling. An example in complex topographic terrain. Meteorologische Zeitschrift 14, 31–47.

Matulla, C., Schmutz, S., Melcher, A., Gerersdorfer, T., Haas, P., Dezember 1, 2007a. Assessing the impact of a downscaled climate change simulation on the fish fauna in an Inner-Alpine River. Int J Biometeorol 52, 127–137. doi:10.1007/s00484-007-0107-6

Matulla, C., Zhang, X., Wang, X.L., Wang, J., Zorita, E., Wagner, S., Storch, H., Juli 7, 2007b. Influence of similarity measures on the performance of the analog method for downscaling daily precipitation. Climate Dynamics 30, 133–144. doi:10.1007/s00382-007-0277-2

Matulla, C., Schöner, W., Alexandersson, H., Storch, H., Wang, X.L., 2008. European storminess: late nineteenth century to present. Climate Dynamics 31, 125–130. doi:10.1007/s00382-007-0333-y

Matulla, C., Hofstätter, M., Auer, I., Böhm, R., Maugeri, M., von Storch, H., Krueger, O., 2012. Storminess in northern Italy and the Adriatic Sea reaching back to 1760. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, The Climate of Venetia and Northern Adriatic 40–41, 80–85. doi:10.1016/j.pce.2011.04.010

Meehl, G.A., Stocker, T.F., Collins, W.D., Friedlingstein, P., Gaye, A.T., Gregory, J.M., Kitoh, A., Knutti, R., Murphy, J.M., Noda,

A., Raper, S.C.B., Watterson, I.G., Weaver, A.J., Zhao, Z.C., 2007. Global Climate Projections, in: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, M., Tignor, M., Miller, H.L. (Eds.), Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Meehl, G.A., Tebaldi, C., 2004. More Intense, More Frequent, and Longer Lasting Heat Waves in the 21st Century. Science 305, 994–997. doi:10.1126/science.1098704

Meissner, C., Schädler, G., Panitz, H.-J., Feldmann, H., Kottmeier, C., 2009. High-resolution sensitivity studies with the regional climate model COSMO-CLM. Meteorologische Zeitschrift 18, 543–557. doi:10.1127/0941-2948/2009/0400

Mohr, S., Kunz, M., 2013a. Changes in the Hail Potential Over Past and Future Decades – Identification Using a Logistic Hail Model. Journal of Geophysical Research – eingereicht.

Mohr, S., Kunz, M., 2013b. Recent trends and variabilities of convective parameters relevant for hail events in Germany and Europe. Atmospheric Research, 6th European Conference on Severe Storms 2011. Palma de Mallorca, Spain 123, 211–228. doi:10.1016/j.atmosres.2012.05.016

Monteith, J.L., 1981. Evaporation and surface temperature. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 107, 1–27. doi:10.1002/qj.49710745102

Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A., Jung, T.Y., Kram, T., La Rovere, E.L., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Riahi, K., Roehrl, A., Rogner, H.-H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S., Swart, R., van Rooijen, S., Victor, N., Dadi, Z., 2000. Special Report on Emissions Scenarios (SRES), A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Nikulin, G., KjellströM, E., Hansson, U., Strandberg, G., Ullerstig, A., 2011. Evaluation and future projections of temperature, precipitation and wind extremes over Europe in an ensemble of regional climate simulations: TEMPERATURE, PRECIPITATION AND WIND EXTREMES OVER EUROPE. Tellus A 63, 41–55. doi:10.1111/j.1600-0870.2010.00466.x

ÖNORM, 2005. ÖNORM EN ISO 15927-4 - Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Gebäuden - Berechnung und Darstellung von Klimadaten - Teil 4: Stündliche Daten zur Abschätzung des Jahresenergiebedarfs für Heiz- und Kühlsysteme (ISO 15927-4:2005).

Palmer, T.N., Shutts, G.J., Hagedorn, R., Doblas-Reyes, F.J., Jung, T., Leutbecher, M., 2005. Representing model uncertainty in weather and climate prediction. Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 33, 163–193. doi:10.1146/annurev.earth.33.092203.122552

Panitz, H.-J., Dosio, A., Büchner, M., Lüthi, D., Keuler, K., 2013. COSMO-CLM (CCLM) climate simulations over CORDEX-Africa domain: analysis of the ERA-Interim driven simulations at 0.44° and 0.22° resolution. Climate Dynamics. doi:10.1007/s00382-013-1834-5

Parajka, J., Blöschl, G., 2012. MODIS-based snow cover products, validation and hydrologic applications, in: Chang, N.B., Hong, Y. (Eds.), Multiscale Hydrologic Remote Sensing. CRC Press, pp. 185–212.

Penlap, E.K., Matulla, C., von Storch, H., Kamga, F.M., 2004. Downscaling of GCM scenarios to assess precipitation changes in the little rainy season (March-June) in Cameroon. Climate Research 26, 85–96.

Philipp, A., Bartholy, J., Beck, C., Erpicum, M., Esteban, P., Fettweis, X., Huth, R., James, P., Jourdain, S., Kreienkamp, F., Krennert, T., Lykoudis, S., Michalides, S.C., Pianko-Kluczynska, K., Post, P., Álvarez, D.R., Schiemann, R., Spekat, A., Tymvios, F.S., 2010. Cost733cat – A database of weather and circulation type classifications. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, Classifications of Atmospheric Circulation Patterns – Theory and Applications 35, 360–373. doi:10.1016/j.pce.2009.12.010

Philipp, A., Della-Marta, P.M., Jacobeit, J., Fereday, D.R., Jones, P.D., Moberg, A., Wanner, H., 2007. Long-Term Variability of Daily North Atlantic–European Pressure Patterns since 1850 Classified by Simulated Annealing Clustering. Journal of Climate 20, 4065–4095.

Piani, C., Haerter, J.O., Coppola, E., 2009. Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. Theoretical and Applied Climatology 99, 187–192. doi:10.1007/s00704-009-0134-9

Pielke, R.A., 2001. Mesoscale Meteorological Modeling, 2 edition. ed. Academic Press, San Diego.

Pinto, J.G., Fröhli, E.L., Leckebusch, G.C., Ulbrich, U., 2007. Changing European storm loss potentials under modified climate conditions according to ensemble simulations of the ECHAM5/MPI-OM1 GCM. Natural Hazards Earth System Sciences 7, 165–17.

Plavcová, E., Kyselý, J., 2013. Projected evolution of circulation types and their temperatures over Central Europe in climate models. Theoretical and Applied Climatology 114, 625–634. doi:10.1007/s00704-013-0874-4

Pospichal, B., Formayer, H., Haas, P., Nadeem, I., 2010. Bias correction and localization of regional climate scenarios over mountainous area on a 1x1 km grid.

Prein, A.F., Gobiet, A., 2011. NHCM-1: Non-hydrostatic climate modelling. Part I: Defining and Detecting Added Value in Cloud-Resolving Climate Simulations (Scientifc Report No. No. 39-2011). Wegener Center Verlag.

Prein, A.F., Gobiet, A., Suklitsch, M., Truhetz, H., Awan, N.K., Keuler, K., Georgievski, G., 2013. Added value of convection permitting seasonal simulations. Climate Dynamics 1–23. doi:10.1007/s00382-013-1744-6

Prein, A.F., Gobiet, A., Truhetz, H., 2011. Analysis of uncertainty in large scale climate change projections over Europe. Meteorologische Zeitschrift 20, 383–395. doi:10.1127/0941-2948/2011/0286

Racsko, P., Szeidl, L., Semenov, M., 1991. A serial approach to local stochastic weather models. Ecological modelling 57, 27–41. doi:10.1016/0304-3800(91)90053-4

Räisänen, J., 2001. Hiilidioksidin lisääntymisen vaikutus Pohjois-Euroopan ilmastoon globaaleissa ilmastomalleissa (The impact of increasing carbon dioxide on the climate of northern Europe in global climate models). Terra 1130.

Rauthe, M., Paeth, H., 2004. Relative importance of Northern Hemisphere circulation modes in predicting regional climate change. Journal of climate 17, 4180–4189. doi:10.1175/JCLI3140.1

Rial, J.A., Pielke Sr., R.A., Beniston, M., Claussen, M., Canadell, J., Cox, P., Held, H., de Noblet-Ducoudré, N., Prinn, R., Reynolds, J.F., Salas, J.D., 2004. Nonlinearities, Feedbacks and Critical Thresholds within the Earth's Climate System. Climatic Change 65, 11–38. doi:10.1023/B:CLIM.0000037493.89489.3f

Richardson, C.W., 1981. Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. Water Resources Research 17, 182–190. doi:10.1029/WR017i001p00182

Riediger, U., Gratzki, A., 2014. Future weather types and their influence on mean and extreme climate indices for precipitation and temperature in Central Europe. Meteorologische Zeitschrift. doi:10.1127/0941-2948/2014/0519

Rogelj, J., Meinshausen, M., Knutti, R., 2012. Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates. Nature Clim. Change 2, 248–253. doi:10.1038/nclimate1385

Rowell, D.P., 2005. A scenario of European climate change for the late twenty-first century: seasonal means and interannual variability. Climate Dynamics 25, 837–849. doi:10.1007/s00382-005-0068-6

Sailor, D.J., Li, X., 1999. A semiempirical downscaling approach for predicting regional temperature impacts associated with climatic change. Journal of Climate 12, 103–114.

Scaife, A.A., Woollings, T., Knight, J., Martin, G., Hinton, T., 2010. Atmospheric Blocking and Mean Biases in Climate Models. Journal of Climate 23, 6143–6152. doi:10.1175/2010JCLI3728.1

Schaumberger, A., 2011. Räumliche Modelle zur Vegetations- und Ertragsdynamik im Wirtschaftsgrünland. Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, Irdning.

Scheifinger, H., Menzel, A., Koch, E., Peter, C., Ahas, R., 2002. Atmospheric mechanisms governing the spatial and temporal variability of phenological phases in central Europe. International Journal of Climatology 22, 1739–1755. doi:10.1002/joc.817

Schicker, I., Seibert, P., 2009. Simulation of the meteorological conditions during a winter smog episode in the Inn Valley. Meteorology and Atmospheric Physics 103, 211–222. doi:10.1007/s00703-008-0346-z

Schmidt, H., von Storch, H., 1993. German Bight storms analyzed. Nature 365, 791–791.

Schöner, W., Böhm, R., Haslinger, K., 2011. Klimaänderung in Österreich – hydrologisch relevante Klimaelemente. Österr Wasser- und Abfallw 63, 11–20. doi:10.1007/s00506-010-0271-5

Semenov, M.A., Brooks, R.J., Barrow, E.M., Richardson, C.W., 1998. Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. Climate research 10, 95–107.

Semenov, V., Bengtsson, L., 2002. Secular trends in daily precipitation characteristics: greenhouse gas simulation with a coupled AOGCM. Climate Dynamics 19, 123–140. doi:10.1007/s00382-001-0218-4

Seneviratne, S.I., Lüthi, D., Litschi, M., Schär, C., 2006. Land–atmosphere coupling and climate change in Europe. Nature 443, 205–209. doi:10.1038/nature05095

Seneviratne, S.I., Nicholls, N., Easterling, D., Goodess, C.M., Kanae, S., Jossin, J., Lu, Y., Marengo, J., McInnes,, K., Rahimi, M., Reichstein, M., Sorteberg, A., Vera, C., Zhang, X., 2012. Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment., in: Field, C.B., Barros, V., Stocker, T.F., Qin, D., Dokken, D.J., Ebi, K.L., Mastrandrea, M.D., Mach, K.J., Plattner, G.-K., Allen, S.K., Tignor, M., Midgley, P.M. (Eds.), Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation ., A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 109–230.

Sheffield, J., Wood, E.F., Roderick, M.L., 2012. Little change in global drought over the past 60 years. Nature 491, 435–438. doi:10.1038/nature11575

Smiatek, G., Kunstmann, H., Knoche, R., Marx, A., 2009. Precipitation and temperature statistics in high-resolution regional climate models: Evaluation for the European Alps. Journal of Geophysical Research 114. doi:10.1029/2008JD011353

Smolarkiewicz, P.K., Grell, G.A., 1992. A class of monotone interpolation schemes. Journal of Computational Physics 101, 431–440. doi:10.1016/0021-9991(92)90018-T

Stefanicki, G., Talkner, P., Weber, R.O., 1998. Frequency Changes of Weather Types in the Alpine Region since 1945. Theor Appl Climatol 60, 47–61. doi:10.1007/s007040050033

Stensrud, D.J., 2007. Parameterization schemes: keys to understanding numerical weather prediction models. Cambridge University Press, Cambridge.

Stephenson, D., Vitolo, R., Ferro, C., 2009. Clustering of Extreme Storms [http://www.eurandom.nl/events/workshops/2009/Climate/stephenson.pdf].

Stephenson, D.B., Pavan, V., Collins, M., Junge, M.M., Quadrelli, R., 2006. North Atlantic Oscillation response to transient greenhouse gas forcing and the impact on European winter climate: a CMIP2 multi-model assessment. Climate Dynamics 27, 401–420. doi:10.1007/s00382-006-0140-x

Strauss, F., Formayer, H., Schmid, E., 2013. High resolution climate data for Austria in the period 2008-2040 from a statistical climate change model. International Journal of Climatology 33, 430–443. doi:10.1002/joc.3434

Suklitsch, M., Gobiet, A., Leuprecht, A., Frei, C., 2008. High Resolution Sensitivity Studies with the Regional Climate Model CCLM in the Alpine Region. Meteorologische Zeitschrift 17, 467–476. doi:10.1127/0941-2948/2008/0308

Suklitsch, M., Gobiet, A., Truhetz, H., Awan, N.K., Göttel, H., Jacob, D., 2011. Error characteristics of high resolution regional climate models over the Alpine area. Climate Dynamics 37, 377–390. doi:10.1007/s00382-010-0848-5

Szalai, S., Bihari, Z., Szentimrey, T., Lakatos, M. (Eds.), 2004. Proceedings from the Conference on spatial interpolation in climatology and meteorology. EUR-OP, Budapest, Hungary.

Tang, H., Eronen, J.T., Micheels, A., Ahrens, B., 2013. Strong interannual variation of the Indian summer monsoon in the Late Miocene. Climate Dynamics 41, 135–153. doi:10.1007/s00382-012-1655-y

Taylor, K.E., Stouffer, R.J., Meehl, G.A., 2012. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. Bulletin of the American Meteorological Society 93, 485–498. doi:10.1175/BAMS-D-11-00094.1

Tebaldi, C., Hayhoe, K., Arblaster, J.M., Meehl, G.A., 2006. Going to the Extremes: an intercomparison of model-simulated historical and future changes in extreme events. Climatic Change 79, 185–211. doi:10.1007/s10584-006-9051-4

Themeßl, J.M., Gobiet, A., Leuprecht, A., August 2011a. Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models. International Journal of Climatology 31, 1530–1544. doi:10.1002/joc.2168

Themeßl, M.J., Gobiet, A., Heinrich, G., September 23, 2011b. Empirical-statistical downscaling and error correction of regional climate models and its impact on the climate change signal. Climatic Change 112, 449–468. doi:10.1007/s10584-011-0224-4

Trigo, R.M., Palutikof, J.P., 1999. Simulation of daily temperatures for climate change scenarios over Portugal: a neural network model approach. Climate Research 13, 45–59.

Truhetz, H., Gobiet, A., Kirchengast, G., 2007. Evaluation of a dynamic-diagnostic modelling approach to generate highly resolved wind fields in the Alpine region. Meteorologische Zeitschrift 16, 191–201. doi:10.1127/0941-2948/2007/0192

Tyler, D.E., 1982. On the optimality of the simultaneous redundancy transformations. Psychometrika 47, 77–86. doi:10.1007/BF02293852

Van der Linden, P., Mitchell, J.F.B. (Eds.), 2009. ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, Fitz-Roy Road, Exeter EX1 3PB, UK.

Van Lipzig, N.P.M., Van Meijgaard, E., Oerleman, J., 1998. Evaluation of a regional atmospheric model for January 1993, using in situ measurements from the Antarctic. Annals of Glaciology 27, 507–514.

Van Ulden, A., Lenderink, G., Hurk, B., Meijgaard, E., 2007. Circulation statistics and climate change in Central Europe: PRUDENCE simulations and observations. Climatic Change 81, 179–192. doi:10.1007/s10584-006-9212-5

Van Ulden, A.P., van Oldenborgh, G.J., 2006. Large-scale atmospheric circulation biases and changes in global climate model simulations and their importance for climate change in Central Europe. Atmospheric Chemistry and Physics 6, 863–881.

Van Vuuren, D.P., Stehfest, E., Elzen, M.G.J. den, Kram, T., Vliet, J. van, Deetman, S., Isaac, M., Goldewijk, K.K., Hof, A., Beltran, A.M., Oostenrijk, R., Ruijven, B. van, 2011. RCP2.6: exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2 °C. Climatic Change 109, 95–116. doi:10.1007/s10584-011-0152-3

Vautard, R., Gobiet, A., Jacob, D., Belda, M., Colette, A., Déqué, M., Fernández, J., García-Díez, M., Goergen, K., Güttler, I., Halenka, T., Karacostas, T., Katragkou, E., Keuler, K., Kotlarski, S., Mayer, S., Meijgaard, E., Nikulin, G., Patarčić, M., Scinocca, J., Sobolowski, S., Suklitsch, M., Teichmann, C., Warrach-Sagi, K., Wulfmeyer, V., Yiou, P., 2013. The simulation of European heat waves from an ensemble of regional climate models within the EURO-CORDEX project. Climate Dynamics 41, 2555–2575. doi:10.1007/s00382-013-1714-z

Von Storch, H., 1995. Inconsistencies at the interface of climate impact studies and global climate research. Meteorologische Zeitschrift 4, 72–80.

Von Storch, H., Zorita, E., Cubasch, U., 1993. Downscaling of global climate change estimates to regional scales: an application to Iberian rainfall in wintertime. Journal of Climate 6, 1161–1171. doi:10.1175/1520-0442(1993)006<1161:DOGCCE>2.0.CO;2

Von Storch, H., Zwiers, F.W., 1999. Statistical analysis in climate research. Cambridge University Press.

Voss, R., May, W., Roeckner, E., 2002. Enhanced resolution modelling study on anthropogenic climate change: changes in extremes of the hydrological cycle. Int. J. Climatol. 22, 755–777. doi:10.1002/joc.757

Wang, G., 2005. Agricultural drought in a future climate: results from 15 global climate models participating in the IPCC 4th assessment. Climate Dynamics 25, 739–753. doi:10.1007/s00382-005-0057-9

Wanner, H., Rickli, R., Salvisberg, E., Schmutz, C., Schüepp, M., 1997. Global climate change and variability and its influence on Alpine climate — concepts and observations. Theor Appl Climatol 58, 221–243. doi:10.1007/BF00865022

WASA, 1998. Changing Waves and Storms in the Northeast Atlantic? Bulletin of the American Meteorological Society 79, 741–760. doi:10.1175/1520-0477(1998)079<0741:CWASIT >2.0.CO;2

Wehner, M.F., 2004. Predicted twenty-first-century changes in seasonal extreme precipitation events in the Parallel Climate Model. Journal of Climate 17, 4281–4290.

Weichert, A., Bürger, G., 1998. Linear versus nonlinear techniques in downscaling. Climate Research 10, 83–93.

Wetherald, R.T., Manabe, S., 1995. The mechanisms of summer dryness induced by greenhouse warming. Journal of Climate 8, 3096–3108. doi:10.1175/1520-0442(1995)008<3096:TMOSD I>2.0.CO;2

Wilby, R.L., Wigley, T.M.L., Conway, D., Jones, P.D., Hewitson, B.C., Main, J., Wilks, D.S., 1998. Statistical downscaling of general circulation model output: A comparison of methods. Water resources research 34, 2995–3008. doi:10.1029/98WR02577

Wilcke, R.A.I., Mendlik, T., Gobiet, A., 2013. Multi-variable error correction of regional climate models. Climatic Change 120, 871–887. doi:10.1007/s10584-013-0845-x

Wilks, D.S., 1999. Multisite downscaling of daily precipitation with a stochastic weather generator. Climate Research 11, 125–136.

Winkler, J.A., Palutikof, J.P., Andresen, J.A., Goodess, C.M., 1997. The simulation of daily temperature time series from GCM output. Part II: Sensitivity analysis of an empirical transfer function methodology. Journal of Climate 10, 2514–2532. doi:10.1175/1520-0442(1997)010<2514:TSODTT>2.0.CO;2

Woollings, T., 2010. Dynamical influences on European climate: an uncertain future. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 368, 3733–3756. doi:10.1098/rsta.2010.0040

Yaqub, A., Seibert, P., Formayer, H., 2011. Diurnal precipitation cycle in Austria. Theoretical and Applied Climatology 103, 109–118. doi:10.1007/s00704-010-0281-z

Zorita, E., Hughes, J.P., Lettemaier, D.P., von Storch, H., 1995. Stochastic Characterization of Regional Circulation Patterns for Climate Model Diagnosis and Estimation of Local Precipitation. Journal of Climate 8, 1023–1042. doi:10.1175/1520-0442(1995)008<1023:SCORCP>2.0.CO;2

Zorita, E., von Storch, H., 1999. The Analog Method as a Simple Statistical Downscaling Technique: Comparison with More Complicated Methods. Journal of Climate 12, 2474–2489. doi:10.1175/1520-0442(1999)012<2474:TAMAAS>2.0.CO;2

Zwiers, F.W., Kharin, V.V., 1998. Changes in the Extremes of the Climate Simulated by CCC GCM2 under CO_2 Doubling. Journal of Climate 11, 2200–2222. doi:10.1175/1520-0442(1998)011<2200:CITEOT>2.0.CO;2

Band 1 Kapitel 5: Zusammenschau, Schlussfolgerungen und Perspektiven

Volume 1 Chapter 5: Synthesis, Conclusions and Perspectives

Koordinierende LeitautorInnen
Wolfgang Schöner, Andreas Gobiet, Helga Kromp-Kolb

LeitautorInnen
Reinhard Böhm[†], Michael Hofstätter, Maja Zuvela-Aloise

Beiträge von
Naumann Awan, Klaus Haslinger, Lukas Meyer, Peter Weish

Für den Begutachtungsprozess
Fred Luks

Inhalt

ZUSAMMENFASSUNG

In den letzten Jahrzehnten ist ein schlüssiges Bild des globalen Klimawandels, seiner Ursachen und der spezifischen Ausprägungen in Österreich entstanden. Das Bild ist jedoch von unterschiedlicher Schärfe und Belastbarkeit. Die Temperaturänderung der letzten 250 Jahre in Österreich ist etwa halb so groß wie der Anstieg, der bis Ende des Jahrhunderts zu erwarten ist, legt man ein „business-as-usual" Szenario zugrunde. Beim Niederschlag ist hingegen die erwartete Änderung klein gegenüber den Unsicherheiten und wird vor allem im Sommer und erst in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts deutlich ausgeprägt sein.

Die außerordentlich wertvolle Klimareihe des Sonnblickobservatoriums, am Alpenhauptkamm in 3 106 m Seehöhe gelegen, zeigt seit dem Ende des 19. Jahrhunderts über den Temperaturanstieg hinaus eine deutliche Zunahme der Sonnenscheindauer und der Globalstrahlung sowie eine deutliche Verschiebung von Schneefall zu Regen. Ein beträchtlicher Rückgang der Gletscher und Auftauen des Permafrostes sind die Folgen.

Wie in allen größeren Städten überlagern sich in Wien städtische Wärmeinsel und klimawandelbedingter Temperaturanstieg und bedingen besonders hohe Temperaturen in dicht verbauten Gebieten. Charakteristisch ist die geringer werdende nächtliche Abkühlung. Im Laufe dieses Jahrhunderts ergibt sich, unabhängig vom zugrunde gelegten Szenario, beträchtlicher Anpassungsbedarf in stadtplanerischer Hinsicht und bei Gebäuden. Weiterer Zuzug und die erwartete Verdichtung und Ausweitung des verbauten Gebietes werden die Situation verschärfen.

Für das Hochwasserrisiko in Österreich ist das Klima im Mittelmeerraum von besonderer Bedeutung, entstehen doch über dem Golf von Genua jene Tiefdruckgebiete, die als „Vb-Lagen" im Alpenraum zu beträchtlichen Niederschlägen führen können. Wiewohl es noch nicht möglich ist künftige Änderungen in der Häufigkeit der Vb-Lagen zu quantifizieren, ist doch deutlich, dass ein wärmeres Mittelmeer zu niederschlagsreicheren Vb-Lagen führen kann.

Für viele gesellschaftliche Fragestellungen genügt der Stand des Wissens über Klimawandel in Österreich; er stellt die Notwendigkeit von Minderungs- und Anpassungsmaßnahmen außer Frage. Noch offene Fragen und Unsicherheiten, ebenso wie die Scheu vor den sich ergebenden gesellschaftlichen Konsequenzen, lassen jedoch die Debatte um die Notwendigkeit und Dringlichkeit von Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel nicht verstummen. Als empirische Wissenschaft kann die Klimatologie grundsätzlich keine strengen Beweise für ihre Theorie des anthropogenen Klimawandels liefern, doch ist deren Kern über zahlreiche Beobachtungen, theoretische Überlegungen und Modellberechnungen gut abgesichert.

Davon getrennt sind umweltethische und gesellschaftspolitische Aspekte zu beachten. Da nicht alle möglichen Konsequenzen des Klimawandels aus ethischer Sicht gleichermaßen wichtig sind, ist es im Sinne einer vorausschauenden Risikobetrachtung notwendig, die obere Grenze möglicher negativer Umweltauswirkungen (das „worst case" Szenario) anzunehmen. Dies entspricht dem Sicherheitsprinzip. Ziel des daran anschließenden Vorsorgeprinzips ist es, das Auftreten irreparabler Schäden, etwa der Gesundheit oder von Ökosystemen, durch geeignete Maßnahmen von vornherein auszuschließen. Daraus folgt, dass die volle Bandbreite möglicher Auswirkungen des Klimawandels darzustellen ist, einschließlich „best case" und „worst case" Szenarien, um der Gesellschaft informierte Entscheidungen zu ermöglichen. In diesem Sinn müssen auch abrupte Änderungen und Kipp-Punkte des Klimasystems als Möglichkeit in Betracht gezogen werden.

SUMMARY

Over the past few decades, a coherent picture of global climate change and its causes and impacts on Austria has been developed. Yet this is a picture of varying accuracy and robustness. During the past 250 years, the observed temperature increase in Austria equals approximately half of that which is expected to occur by 2100, assuming a „business-as-usual" scenario. The expected changes in precipitation, while small compared to their associated uncertainties, will only become more pronounced in the second half of this century and particularly in summertime.

The unique observational dataset of the Sonnblick Observatory (3 106 m above sea level on the main crest of the Alps) indicates not only rising temperatures since the end of the 19th century, but also marked increases in sunshine duration and global radiation, as well as a clear shift from solid (snow) to liquid precipitation (rain). Consequently, glaciers are shrinking considerably and permafrost is thawing.

Like in all larger cities, the temperature increase in Vienna is a combined effect of both global warming and the urban heat island effect. In recent years, particularly high temperatures were observed in built-up areas as well as a characteristic reduction in nighttime cooling. Within the 21st century, regardless of the emission scenarios assumed, a considerable need for climate-change adaptation with regard to spatial planning and buildings will arise. In addition, growing populations and increased density and the extension of built-up areas will create mounting pressure.

It is possible that Lake Neusiedl, being a steppe lake, will dry-up as a result of climate variations, as known from historical events. Due to increased warming, evaporation from this shallow lake is projected to increase to an extent that cannot be compensated by increased precipitation, which itself still remains subject to uncertainty. The possibility exists that precipitation will decrease, further enhancing the risk of the lake drying.

The Mediterranean Sea is an important factor with regard to flood risks in Austria, as low pressure systems originating over the gulf of Genoa, particularly Vb cyclones, can cause considerable precipitation in the Alpine area. Although it is currently not possible to quantify future changes in the frequency of such cyclones, a warming of the Mediterranean Sea could lead to Vb cyclones associated with more intense precipitation.

During the past century, the frequency of different circulation patterns has changed: While the influence of meridional (south-north oriented) circulation patterns has increased, the influence of zonal (west-east oriented) patterns associated with air masses from the Atlantic Ocean has decreased over Central Europe. Although climate models have known weaknesses in correctly representing the statistical properties of circulation patterns, there are indications that high-pressure situations may become more frequent over Western and South-Western Europe in the future.

The state of climate change knowledge in Austria clearly indicates the need for mitigation and adaptation measures. However, open questions and uncertainties which remain, as well as hesitation with regard to the necessary societal changes, have led the discussion about the need and urgency for climate protection and adaptation to climate change to be continued. As an empirical science, climate science cannot deliver strict proof for its climate theory. However, the core results are very well backed-up by observations, theoretical considerations, and model simulations.

KERNAUSSAGEN

- In den letzten Jahrzehnten ist ein schlüssiges Bild des globalen Klimawandels, seiner Ursachen und der spezifischen Ausprägungen in Österreich entstanden.

Das Bild ist jedoch von unterschiedlicher Schärfe und Belastbarkeit: mittlere Veränderungen sind besser belegt und besser abschätzbar als Extremereignisse, großräumigere Aussagen belastbarer als lokale, Aussagen über Veränderungen der Temperatur wesentlich robuster als solche über den Niederschlag und kleinräumige Gewitter schwerer erfassbar als mit großräumigen Fronten verbundene Niederschläge.

- Die in den letzten 250 Jahren beobachteten Änderungen sind gering im Vergleich zu den bis Ende 2100 zu erwartenden.

Dies gilt unabhängig vom Szenario, das zugrundegelegt wird (sehr wahrscheinlich). In der zweiten Hälfte des Jahrhunderts werden die Änderungen wahrscheinlich rascher erfolgen als in der ersten. Aufgrund der großen natürlichen Variabilität der Niederschlagssummen im Sommer, sind in den Klimaprojektionen Änderungen dieser Klimagröße dann erst signifikant und daher nachweisbar.

- Klimaänderungen zeigen ein konsistentes Bild in typischen geographischen Gegebenheiten Österreichs

Die Klimareihen des Hohen Sonnblicks, als Beispiel für den Gebirgsraum, zeigen über den Temperaturanstieg hinaus eine deutliche Zunahme der Sonnenscheindauer und der Globalstrahlung sowie eine deutliche Verschiebung von Schneefall zu Regen. Beträchtlicher Rückgang der Gletscher und Auftauen des Permafrostes sind für den Hohen Sonnblick ebenfalls dokumentiert.

- In Wien, als Beispiel für den urbanen Raum, überlagern sich städtische Wärmeinsel und klimawandelbedingter Temperaturanstieg.

Besonders hohe Temperaturen in dicht verbauten Gebieten, und abnehmende nächtliche Abkühlung sind die Folge. Diese Entwicklung wird sich in den kommenden Jahrzehnten fortsetzen (sehr wahrscheinlich).

- Für das Hochwasserrisiko in Österreich ist das Klima im Mittelmeerraum von besonderer Bedeutung.

Wiewohl es noch nicht möglich ist künftige Änderungen der Häufigkeit der niederschlagsreichen „Vb-Lagen“ zu quantifizieren, ist doch wahrscheinlich, dass ein wärmeres Mittelmeer zu niederschlagsreicheren Vb-Lagen führen wird.

- Die Klimawissenschaft muss die volle Bandbreite möglicher Auswirkungen darstellen.

"Best case" und "worst case" Szenarien müssen bekannt sein, um der Gesellschaft informierte Entscheidungen zu ermöglichen. In diesem Sinn müssen auch abrupte Änderungen und Kipp-Punkte des Klimasystems als Möglichkeit in Betracht gezogen werden.

5.1 Motivation
5.1 Motivation

Die vorangegangenen Kapitel haben anhand von Daten und Fakten aufgezeigt, wie sich das Klima in Österreich in der Vergangenheit verändert hat und gegenwärtig verändert. Aus Modellsimulationen wurden, aufbauend auf Szenarien des globalen Klimawandels, mögliche Entwicklungen des Klimas für die Zukunft aufgezeigt. Trotz aller Fehlerquellen und Unsicherheiten, auf die explizit hingewiesen wurde, ergibt sich ein schlüssiges Bild des Klimawandels und seiner Ursachen. Das Bild ist jedoch von unterschiedlicher Schärfe und Belastbarkeit. Für viele gesellschaftliche Fragestellungen ist der jeweils verfügbare Wissensstand ausreichend. Dazu gehört z. B. die grundsätzliche Frage nach der Notwendigkeit von Minderungs- und Anpassungsmaßnahmen, der in Band 3 nachgegangen wird. Auch viele Auswirkungen künftiger Klimaänderungen lassen sich anhand des gegenwärtigen Verständnisses um den Klimawandel beantworten. Oft lassen sich Bandbreiten ableiten, die hinreichend Information als Grundlage für Entscheidungen liefern. Beispiele dafür finden sich in den beiden Folgebänden, vor allem aber in Band 2, der sich den Auswirkungen des Klimawandels auf natürliche und gesellschaftlich-wirtschaftliche Systeme widmet.

In diesem abschließenden Kapitel des ersten Bandes sollen die Aussagen der vorhergehenden Kapitel zu einer Gesamtsicht zusammengeführt und daraus Schlussfolgerungen abgeleitet werden. Um die Anschaulichkeit der Aussagen über den Klimawandel in Österreich zu erhöhen, werden am Beispiel von ausgewählten Fallstudien diese Veränderungen nochmals übersichtlich und im Sinne eines abgerundeten Bildes dargestellt. Die Fallstudien beschreiben einerseits den Klimawandel in für Österreich typischen geographischen Gegebenheiten (Gebirge, Stadt, See), andererseits relevante Einflussgrößen auf das Klima Österreichs (Mittelmeer, Wetterlagen), die noch eines vertieften Verständnisses und weiterer Forschung in Zukunft bedürfen.

Darüber hinaus – und auch dafür kann die Vergangenheit als Beispiel dienen – ist in Zukunft auch mit Überraschungen zu rechnen: Entwicklungen, die, wenn sie einsetzen, oft recht gut erklärt werden können, allerdings vorher nicht bedacht wurden, aber auch Entwicklungen, die nicht unmittelbar interpretierbar sind und die helfen, das Verständnis des Klimasystems voranzutreiben. Lücken im Systemverständnis und Überraschungen im Zuge wissenschaftlicher Arbeit können ein wesentlicher Motor für den Fortschritt und die Wissensgenerierung sein. Das vorliegende Kapitel gibt hierfür Beispiele.

Ein eigener Abschnitt wird dem Forschungsbedarf gewidmet. Auch hier geht es um eine Gesamtschau unter Berücksichtigung von Überschneidungen und Synergien. Schließlich werden im letzten Abschnitt Kernaussagen zum Klimawandel aus dem Bereich der naturwissenschaftlichen Grundlagen angeführt, die in der Öffentlichkeit oft kontrovers diskutiert werden, wobei eine Bewertung hinsichtlich des Grades der Sicherheit (welcher z. B. aus Qualität und Umfang der Datenbasis abgeschätzt wird) einerseits und des Grads der Übereinstimmung unter WissenschaftlerInnen andererseits, als Hilfe zur Einordnung dieses Wissens verwendet wird. Auch für diesen Abschnitt ist das Zusammenführen von Kernaussagen der Einzelkapitel zu einer Gesamtsicht eine wesentliche Motivation. So gewinnen etwa manche Aussagen über zukünftige Veränderungen des Klimas erst auf Basis des Vergleichs mit den Veränderungen in der Vergangenheit an Schärfe.

All diesen Ausführungen vorangestellt sind Überlegungen zum wissenschaftlichen Erkenntnisprozesses und der Ethik in der Wissenschaft. Klimaforschung, als empirische Wissenschaft, kann keine strengen Beweise liefern, die der Diskussion um den Klimawandel ein klares Ende setzen könnten. Als politisch relevante Wissenschaft steht die Klimaforschung sehr oft unter mehrfachem Druck: Resultate werden oft rascher gebraucht als sie gut abgesichert verfügbar sind und sie fordern Konsequenzen, die einschneidend sein können. Dass derartige Randbedingungen sich auch auf die Qualität der Ergebnisse der Klimaforschung auswirken können, insbesondere aber auf deren Kommunikation, ist naheliegend.

5.2 Naturwissenschaft als empirische Wissenschaft mit ethischer Verantwortung
5.2 Natural sciences as empirical science with ethical responsibility

„*Die Klimaforschung steht als politisch relevante Wissenschaft unter dem Druck, schnell Resultate zu liefern. Und wo diese Resultate kontrovers sind, entsteht in der Öffentlichkeit rasch der Eindruck mangelnder Glaubwürdigkeit. Forschung wird genau dann zum Gegenstand öffentlicher Glaubwürdigkeitsdebatten, wenn epistemische Unsicherheiten auf politische, moralische, soziale oder ökonomische Interessen treffen*“ (Leuschner, 2012).

In der Öffentlichkeit und auch unter WissenschaftlerInnen, deren Expertise nicht im Bereich der Klimatologie oder der Meteorologie liegt, herrscht manchmal Unsicherheit hinsichtlich der wissenschaftlichen Zuverlässigkeit der den anthropogenen Klimawandel betreffenden Feststellungen. Das ist nicht verwunderlich, da Meldungen in den Medien und populärwissenschaftliche Bücher und Filme ein breites Spekt-

rum von Interpretationen anbieten, von der Klimaapokalypse (siehe z. B. den Film „The day after tomorrow" von Roland Emmerich, 2004) über die Verschwörung geld- und machtgieriger WissenschafterInnen (siehe z. B. Crichton, 2004) bis zur rosigen Zukunft in einer wärmeren Welt (siehe z. B. Horx, 2007). Wertvolle Beiträge zur Erklärung, warum jenseits oberflächlicher Geplänkel eine einhellige Meinung zum Klimawandel nicht zu erwarten ist, liefern z. B. Hulme (2009) in einer umfassenden Analyse der kulturellen Dimension des Begriffes Klima, sowie Oreskes und Conway (2010) in einer stark USA-bezogenen Analyse politischer Ideologien als entscheidender Faktor in der Diskussion.

Die Klimafrage ist kein rein akademisches Problem, daher müssen in der Diskussion empirisch wissenschaftliche und erkenntnistheoretische Fragen sauber von umweltethischen und gesellschaftspolitischen Argumenten getrennt werden. Erkenntnistheoretisch ist ein strenger Beweis für den Klimawandel und dessen Ursachen nicht möglich, weil sich die Klimaforschung als eine empirische Wissenschaft versteht, die auf Beobachtung und Erfahrung gründet. Naturwissenschaftliche Theorien sind durch Beobachtungen geprüfte Hypothesen, die durch weitere Beobachtungen entweder erhärtet oder widerlegt werden (siehe z. B. Feynman, 1955). Nach Popper und dem Wiener Positivismus ist es sogar die vornehmliche Aufgabe der Wissenschaft, zu versuchen, die Hypothesen bzw. Theorien zu widerlegen, um so ihre Robustheit und Erklärungsmacht zu stärken (siehe z. B. Popper, 1955). Im praktischen Leben werden viele naturwissenschaftliche Hypothesen und Theorien, wie etwa die Existenz der Schwerkraft, erfolgreich als bewiesenes „Wissen" gehandhabt, ja die gesamte technologische Entwicklung des letzten Jahrhunderts basiert auf solchen Theorien.

Im Lichte dessen kann im Zusammenhang mit dem Klimawandel zwar festgehalten werden, was beobachtet wurde, Deutungen, kausale Erklärungsversuche und Verallgemeinerung können aber aus erkenntnistheoretischer Sicht nie „bewiesen" werden. Dass der Klimawandel etwa anthropogen verursacht ist, kann daher streng genommen nie bewiesen werden. Die Theorie des vom Menschen verursachten Klimawandels ist jedoch durch Modellexperimente belegt und sie ist anderen Theorien oder Hypothesen in Bezug auf Theorieüberprüfungen (z. B. Falsifizierungsversuchen) überlegen. Da sie darüber hinaus bereits seit über 20 Jahren der wissenschaftlichen Überprüfung unterworfen war, ist sie als wesentlich wahrscheinlicher einzuschätzen als andere Hypothesen und es ist sachlich gerechtfertigt, sie weiteren Betrachtungen und auch Entscheidungen zugrunde zu legen. Diesen Überlegungen zufolge ist es jedoch wichtig, Aussagen über den Klimawandel und seine Folgeerscheinungen durch nachvollziehbare Bewertungen der Unsicherheiten zu ergänzen.

Hinsichtlich des umweltethischen und gesellschaftspolitischen Aspektes ist festzuhalten, dass man früher vielleicht noch sagen konnte, das Privileg der WissenschaftlerInnen bestünde darin, sich folgenlos irren zu dürfen. Heute können wissenschaftlich-technische Entwicklungen die Welt in gefährlicher Weise bedrohen – die Verantwortung der WissenschaftlerInnen hat daher zugenommen. Im konkreten Fall des Klimawandels ist die Wissenschaft z. B. dazu aufgerufen zu klären, was unter „dangerous anthropogenic interference" (gefährliche anthropogene Störung) im Klimasystem zu verstehen ist, da die Staaten sich in der Klimarahmenkonvention (UNFCCC, 1992, Artikel 2) verpflichtet haben diese zu vermeiden: „*Das Endziel dieses Übereinkommens und aller damit zusammenhängenden Rechtsinstrumente, welche die Konferenz der Vertragsparteien beschließt, ist es, in Übereinstimmung mit den einschlägigen Bestimmungen des Übereinkommens die Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre auf einem Niveau zu erreichen, auf dem eine gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems verhindert wird. Ein solches Niveau sollte innerhalb eines Zeitraums erreicht werden, der ausreicht, damit sich die Ökosysteme auf natürliche Weise den Klimaänderungen anpassen können, die Nahrungsmittelerzeugung nicht bedroht wird und die wirtschaftliche Entwicklung auf nachhaltige Weise fortgeführt werden kann.*"

Von dieser Definition, bzw. den dahinter liegenden, meist naturwissenschaftlichen Untersuchungen, hängen u. a. Art und Ausmaß der Eingriffe in die Entwicklung des Energie- und Wirtschaftssystems ab. Wie tiefgreifend diese sein können, lässt sich u. a. am Ringen um einen Paradigmenwechsel in den an Wachstum orientierten Wirtschaftstheorien erkennen (vgl. Daly, 1990). Wie eingangs beschrieben, sind naturwissenschaftliche und damit auch klimawissenschaftliche Erkenntnisse mit Unsicherheiten behaftet, sodass immer von mehreren Entwicklungsmöglichkeiten des Klimas und dementsprechend auch der jeweiligen Folgen ausgegangen werden muss. Nicht alle wahrscheinlichen oder möglichen Konsequenzen des Klimawandels sind aus ethischer Sicht gleichermaßen wichtig. Sollen Strategien des Umgangs mit dem Klimawandel bewertet werden, sind jedenfalls jene Konsequenzen zu betrachten, die das Risiko der Verletzung grundlegender Rechte von Menschen bergen. Weitgehend unumstritten ist, dass auch zukünftig lebende Menschen Anspruchsrechte haben, die heute lebende Menschen zu respektieren haben. Seit dem „Brundtland-Bericht" (1987) ist „sustainable development" („Dauerhafte [nachhaltige] Entwicklung ist Entwicklung, die die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne zu riskieren,

dass künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können.“) immer wieder auf internationaler Ebene als Handlungsprinzip – etwa in der Agenda 21 und in den Strategien für eine Nachhaltige Entwicklung der EU – bekräftigt worden. Auch die in Ausarbeitung befindlichen globalen Sustainable Development Goals, die 2015 verabschiedet werden sollen, fußen darauf. „Sustainable development“ ist daher als internationaler ethischer Grundkonsens aufzufassen.

Vielfach wird jedoch der anthropozentrische, ausschließlich auf das Wohlergehen des Menschen ausgerichtete Ansatz der Brundtland Definition als zu eng angesehen. So meint Spaemann (1979) dass der Mensch, solange er die Natur ausschließlich funktional auf seine Bedürfnisse hin interpretiert, im Zuge einer Güterabwägung jeweils von der Natur nur das übrig lassen wird, was bei einer solchen Abwägung im Augenblick noch ungeschoren davonkommt. Der Anteil der Natur werde dabei ständig verkürzt, sodass der Mensch letztlich seine eigene Existenzgrundlage zerstört.

Unabhängig von diesen grundlegenden Fragen des Weltbildes weisen die IPCC-Berichte jedenfalls aus, dass die meisten Szenarien des Klimawandels grundlegende Rechte zukünftig Lebender (z. B. auf Überleben, Gesundheit und Autonomie) verletzen, bei extremeren Szenarien tun sie dies sogar in hohem Maße. Grundlegende Rechte nicht zu verletzen und zu schützen ist eine minimale Forderung der Gerechtigkeit. Aus der Perspektive der Gerechtigkeit ist die Verletzung von Rechten sowohl heute als auch zukünftig Lebender zu vermeiden. Eine Klimapolitik, die viele Menschen vermeidbar dem Risiko der Verletzung ihrer grundlegenden Rechte aussetzt, ist demnach ethisch unzulässig, selbst wenn dieses Risiko gering sein sollte. Das entspricht der Forderung von Hans Jonas, dass einer einigermaßen gut begründeten Unheilsprognose Vorrang vor der Heilsprognose zu geben ist (Jonas, 1979). Jonas begründet damit philosophisch das Sicherheitsprinzip. Andererseits können auch Klimaschutzmaßnahmen, insbesondere wenn unreflektiert oder überhastet getroffen, Menschenleben kosten. Das System Erde ist ein komplexes, gekoppeltes System, das die globale Gesellschaft und Wirtschaft einschließt, die ihrerseits wieder stark gekoppelt und von einander abhängig sind (Planet under Pressure, 2012). Ethisches Handeln erfordert daher gesamtheitliche Betrachtungsweisen.

Zur Orientierung können drei Prinzipien der Umweltethik herangezogen werden, die sich in unterschiedlicher Form auch in den Rechtskörpern vieler Staaten wiederfinden: das Sicherheitsprinzip, das Vorsorgeprinzip und das Verursacherprinzip. Das Sicherheitsprinzip verlangt, im Zweifel für mögliche negative Umweltauswirkungen deren obere Grenze (das „worst case scenario“) anzunehmen. Analog zum Grundsatz *in dubio pro reo* (im Zweifel für den Angeklagten) der Rechtssprechung, soll der Grundsatz i*n dubio pro securitate* (im Zweifel für die Sicherheit) gelten. Dies entspricht auch üblichem, vorausschauendem Umgang mit Risiko: Die Frage ob Klimaschutzmaßnahmen zu treffen sind oder nicht, lässt sich z. B. in einer Matrix mit vier Feldern abarbeiten, die aufgespannt werden von Zutreffen oder Nicht-Zutreffen der Theorie des anthropogenen Klimawandels auf der einen Achse und Klimaschutzmaßnahmen-Setzen oder Nicht-Setzen auf der anderen (Craven, 2009). Betrachtet man die jeweils ungünstigsten Konsequenzen in jedem der vier Felder, so zeigt sich, dass im Fall des Ergreifens von Maßnahmen im schlimmsten Fall die Wirtschaft ohne Notwendigkeit beeinträchtigt wird – aber selbst das ist umstritten – weil Klimaschutzmaßnahmen auch wirtschaftliche Vorteile bringen können. Die schlimmsten Konsequenzen wenn keine Maßnahmen getroffen werden sind hingegen klimabedingte Extremereignisse, Verlust von Land, Hungersnöte, etc. und, wenn Kipp-Punkte einbezogen werden, die Unmöglichkeit das Klima noch zu stabilisieren. Vom Standpunkt der Risikobetrachtung sind daher, unabhängig vom Zutreffen der Theorie des anthropogenen Klimawandels und ganz im Sinn des Sicherheitsprinzips, wenn auch nicht direkt daraus ableitbar, Klimaschutzmaßnahmen zu setzen.

Das Vorsorgeprinzip baut auf dem Sicherheitsprinzip auf und bezweckt, das Auftreten irreparabler Gesundheits- und Ökosystemschäden von vornherein auszuschließen, indem riskante Unternehmungen nicht zugelassen werden. Allerdings bleibt uns im Falle der Klimapolitik möglicherweise nur mehr die Wahl zwischen Optionen, die alle irreparablen Schäden als Konsequenz des Klimawandels beinhalten. Die Erklärung der UN-Konferenz für Umwelt und Entwicklung (UNCED) 1992 in Rio konkretisiert das Vorsorgeprinzip in Kapitel 35 Absatz 3 der Agenda 21:

„*Angesichts der Gefahr irreversibler Umweltschäden soll ein Mangel an vollständiger wissenschaftlicher Gewissheit nicht als Entschuldigung dafür dienen, Maßnahmen hinauszuzögern, die in sich selbst gerechtfertigt sind. Bei Maßnahmen, die sich auf komplexe Systeme beziehen, die noch nicht voll verstanden worden sind und bei denen die Folgewirkungen von Störungen noch nicht vorausgesagt werden können, könnte der Vorsorgeansatz als Ausgangsbasis dienen.*“

Ein über jeden Zweifel erhabener wissenschaftlicher Nachweis negativer Folgen ist demnach zum Setzen von Maßnahmen nicht erforderlich, es genügt ein plausibel begründeter Verdacht. Daher sind Zweifel an der anthropogenen Beeinflussung des Klimas – selbst wenn sie aus rein akademischer Sicht gerechtfertigt wären – nicht als Rechtfertigung eines „business as usual“ zu akzeptieren, umso mehr, als die gleichen Maßnah-

men, die zum „Klimaschutz“ gefordert werden, auch andere positive Auswirkungen haben und z. B. für die notwendige Energiewende unabdingbar sind. Dass die Energiewende und der Übergang zu einer nachhaltigen Gesellschaft eine Vielzahl von bedeutenden Vorteilen bringen kann, wird im Global Energy Assessment (GEA, 2012) ausführlich dargestellt.

Das Verursacherprinzip sieht vor – im Sinne der Verantwortungsethik – jedeN VerursacherIn von Gesundheits- und Ökosystemschäden konsequent und im allgemeinsten Sinn zur Verantwortung zu ziehen, auch wenn der rechtliche Rahmen dafür vielfach noch fehlen mag. Die konkrete Umsetzung dieses Prinzips sorgt z. B. in den internationalen Klimakonferenzen (COP) für heftige und bisher ergebnislose Diskussionen über die Anrechnung bisheriger Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) und deren Bewertung in Hinblick auf künftige Minderungs- und Anpassungsmaßnahmen und deren Finanzierung.

In diesen Themenkomplex eingebettet lässt sich für die Klimawissenschaft ableiten, dass sie jedenfalls die volle Bandbreite möglicher Auswirkungen darstellen muss, einschließlich „best case“ und „worst case“ Szenarien, um der Gesellschaft informierte Entscheidungen zu ermöglichen.

5.3 Zusammenschau: Klimaänderung in Österreich 1800–2100
5.3 Synopsis: climate change in Austria 1800–2100

In den letzten Jahrzehnten ist ein schlüssiges Bild des globalen Klimawandels, seiner Ursachen und der spezifischen Ausprägungen in Österreich entstanden. Das Bild ist jedoch von unterschiedlicher Schärfe und Belastbarkeit: Mittlere Veränderungen sind besser belegt und besser abschätzbar als Extremereignisse, Aussagen über Veränderungen der Temperatur wesentlich robuster, als solche über den Niederschlag, großräumigere Aussagen belastbarer als lokale, daher z. B. kleinräumige Gewitter schwerer erfassbar als mit großräumigen Fronten verbundene Niederschläge.

Die Veränderungen der mittleren Verhältnisse des Klimas in Österreich hinsichtlich Temperatur und Niederschlag können für die Vergangenheit sehr gut durch den HISTALP Datensatz beschrieben werden (siehe Band 1, Kapitel 3). So ist etwa die Temperatur in Österreich seit 1880 um nahezu 2 °C gestiegen, verglichen mit einer globalen Erhöhung um 0,85 °C (siehe Band 1, Kapitel 1). Der erhöhte Anstieg ist speziell auch für die Zeit ab 1980 beobachtbar, in der dem globalen Anstieg von etwa 0,5 °C eine Temperaturzunahme von etwa 1 °C in Österreich gegenüber steht. Wesentlich uneinheitlicher stellt sich die Niederschlagsentwicklung der letzten 150 Jahren dar: Sie zeigt deutliche regionale Unterschiede mit einer Zunahme in Westösterreich um etwa +10 % bis +15 % und einer Abnahme im Südosten in ähnlicher Größenordnung. Auch für andere meteorologische Elemente gibt es in Österreich gute Beobachtungen, so kann etwa gezeigt werden, dass in den letzten 130 Jahren insbesondere im Sommerhalbjahr die Sonnenscheindauer an den Bergstationen der Alpen deutlich zugenommen hat (siehe Band 1, Kapitel 3). Aus derartigen Änderungen lassen sich weitere Konsequenzen ableiten, die auch instrumentell bestätigt werden konnten, wie etwa eine Abnahme der Dauer der Schneebedeckung und ein Rückgang der Gletscher (siehe Fallbeispiel Abschnitt 5.4.1).

Für die Beschreibung von Projektionen des Klimas in die Zukunft stehen zum Zeitpunkt der Verfassung dieses Berichts als aktuellste Datenquellen die Simulationen aus dem EU-Projekt Ensembles sowie insbesondere aus dem nationalen Projekt reclip:century zur Verfügung (siehe Band 1, Kapitel 4). In den Abbildungen 5.1 und 5.2 sind die Entwicklungen der Vergangenheit seit 1800 mit den Szenarien für die Zukunft verknüpft. Basis für die zukünftige Entwicklung stellt ein Szenario mit sehr raschem Wirtschaftswachstum, Stabilisierung des Weltbevölkerung Mitte des Jahrhunderts, rascher Verbreitung neuer, effizienterer Technologien und ausgewogener Mischung von Energieträgern dar (SRES Szenario A1B).

Die Projektionen für die Temperatur sind robust und zeigen in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts einen klaren Anstieg von etwa 1,4 °C. In der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts erhöht er sich für das gewählte Szenario auf 3,5 °C.

Bei den Niederschlagssummen ist weder in der Vergangenheit, noch in der Zukunft ein vergleichbar klarer Trend wie bei der Temperatur zu erkennen. Tendenziell ist im Winter eine Zunahme und im Sommer eine Abnahme der Niederschlagssummen zu erwarten, die am Ende des 21. Jahrhunderts bei etwa +10 % (Winter) bzw. –10 bis –20 % (Sommer; je nach Region unterschiedlich) liegen dürfte. Allerdings ist die Bandbreite der Möglichkeiten sehr groß und lässt sowohl stärkere Änderungen als auch unveränderte Niederschläge in allen Saisonen zu. Wenn es zu einer systematischen Änderung kommt, dann wird diese vor allem im Sommer, wahrscheinlich erst in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts deutlich ausgeprägt sein. Im Jahresmittel ist keine starke Änderung der Niederschlagssumme zu erwarten.

In den folgenden Fallbeispielen werden die Veränderungen des Klimas von Österreich für ausgewählte Landschaftstypen (Gebirge, Stadt, Seen) und Einflussgrößen (Mittelmeer, Wetterlagen) zusammenfassend dargestellt und beschrieben.

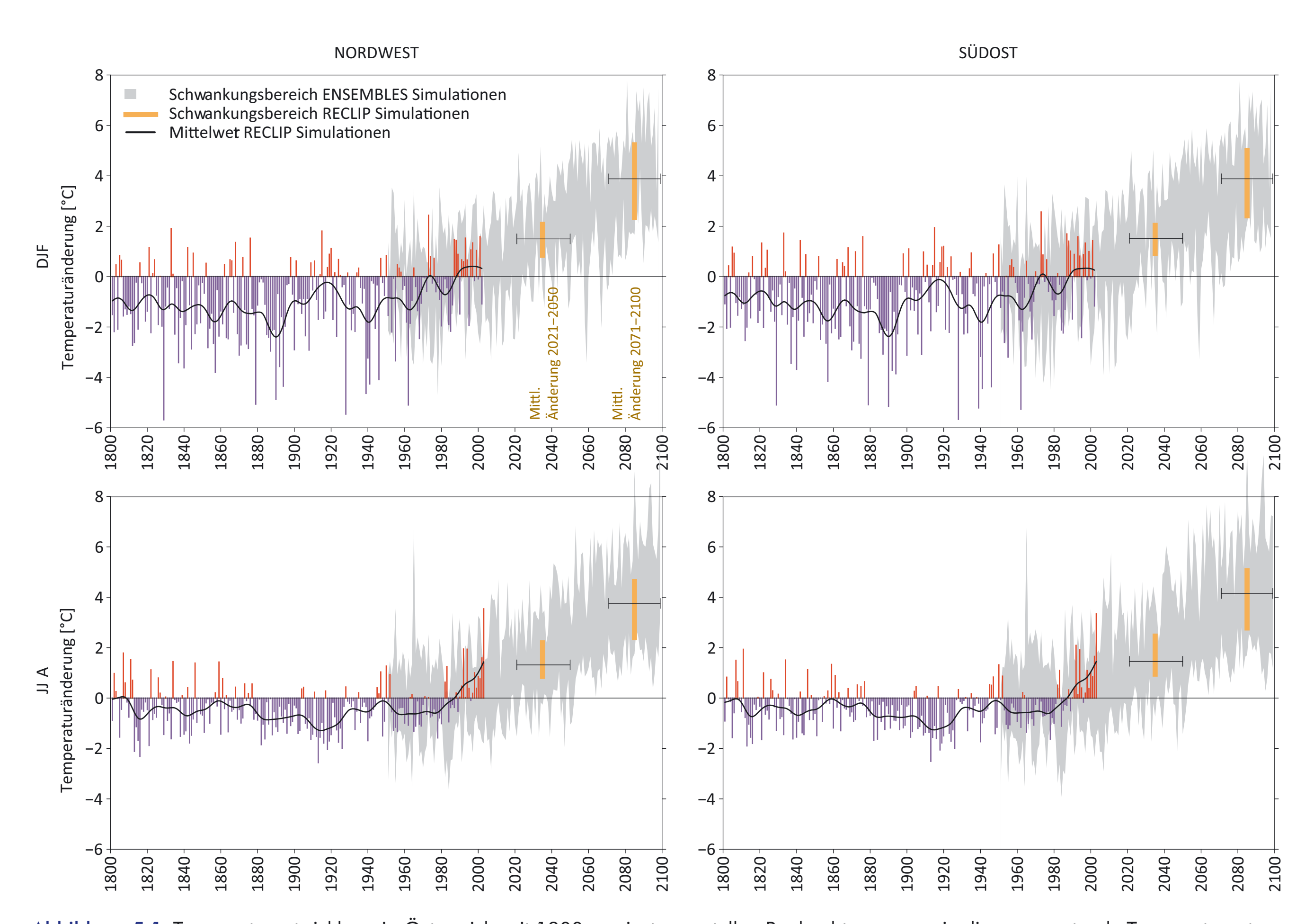


Abbildung 5.1 Temperaturentwicklung in Österreich seit 1800 aus instrumentellen Beobachtungen sowie die zu erwartende Temperaturentwicklung für die Zukunft bis 2100, dargestellt als Abweichung gegenüber dem Mittel 1971–2000. Die Abbildungen oben beziehen sich auf den Winter (DJF), die Abbildungen unten auf den Sommer (JJA), das gesamte Bundesgebiet wurde in zwei Regionen (Nord-West und Süd-Ost) unterteilt. Die Beobachtungsdaten für die Vergangenheit stammen aus der HISTALP Datenbank, die Szenarien für die Zukunft stammen aus 22 Ensembles Simulationen (SRES A1B Szenario, Darstellung als graue Balken für Einzeljahre)[1] und aus reclip:century (SRES Szenarien A1B, A2 und B1, farbige Balken für die Zeitscheiben 2021–2050 und 2071–2100)[2]

Figure 5.1 Temperature in Austria since 1800 (instrumental observations) and expected temperature development until 2100, shown as a deviation from the mean 1971–2000. Figures at the top show the winter season (DJF), figures at the bottom the summer season (JJA); Austria was divided into two regions (north-west and south-east). The observational data for the past come from the HISTALP database, scenarios for the future from the 22 ensemble simulations (SRES scenario A1B, grey bars for single years)[1] and from reclip:century (SRES scenarios A1B, A2 and B1, coulored bars for the time slices 2021–2050 and 2071–2100)[2]

[1] www.ensembles-eu.org

[2] http://reclip.ait.ac.at/reclip_century

5.4 Fallbeispiele: Vergangenes und künftiges Klima in Österreich

5.4 Case study: past and future climate in Austria

5.4.1 Klimaänderung im Gebirge – Ursachen und Wirkungen am Beispiel des Sonnblicks

Das Sonnblickobservatorium (3106 m Seehöhe) in den Hohen Tauern hat eine herausragende Stellung in der österreichischen Klimaforschung (Schöner et al., 2012). Mit den mehr als 125-jährigen Klimazeitreihen und einem weit über die meteorologischen Standardmessungen hinausgehenden atmosphärischen Monitoringprogramm können Veränderungen des Hochgebirgsklimas in Österreich für verschiedene meteorologische Zustandsgrößen gezeigt werden. Die umfangreichen Messungen erleichtern das Verständnis für die Ursachen der Klimaänderung, also Klimaantriebe und eventuelle Rückkoppelungsprozesse. Weitere besondere Werte der Hochgebirgsstationen liegen in ihrer Repräsentativität für große Gebiete sowie der Möglichkeit durch Vergleich mit Tieflandstationen Höhenabhängigkeiten der Klimaänderung zu

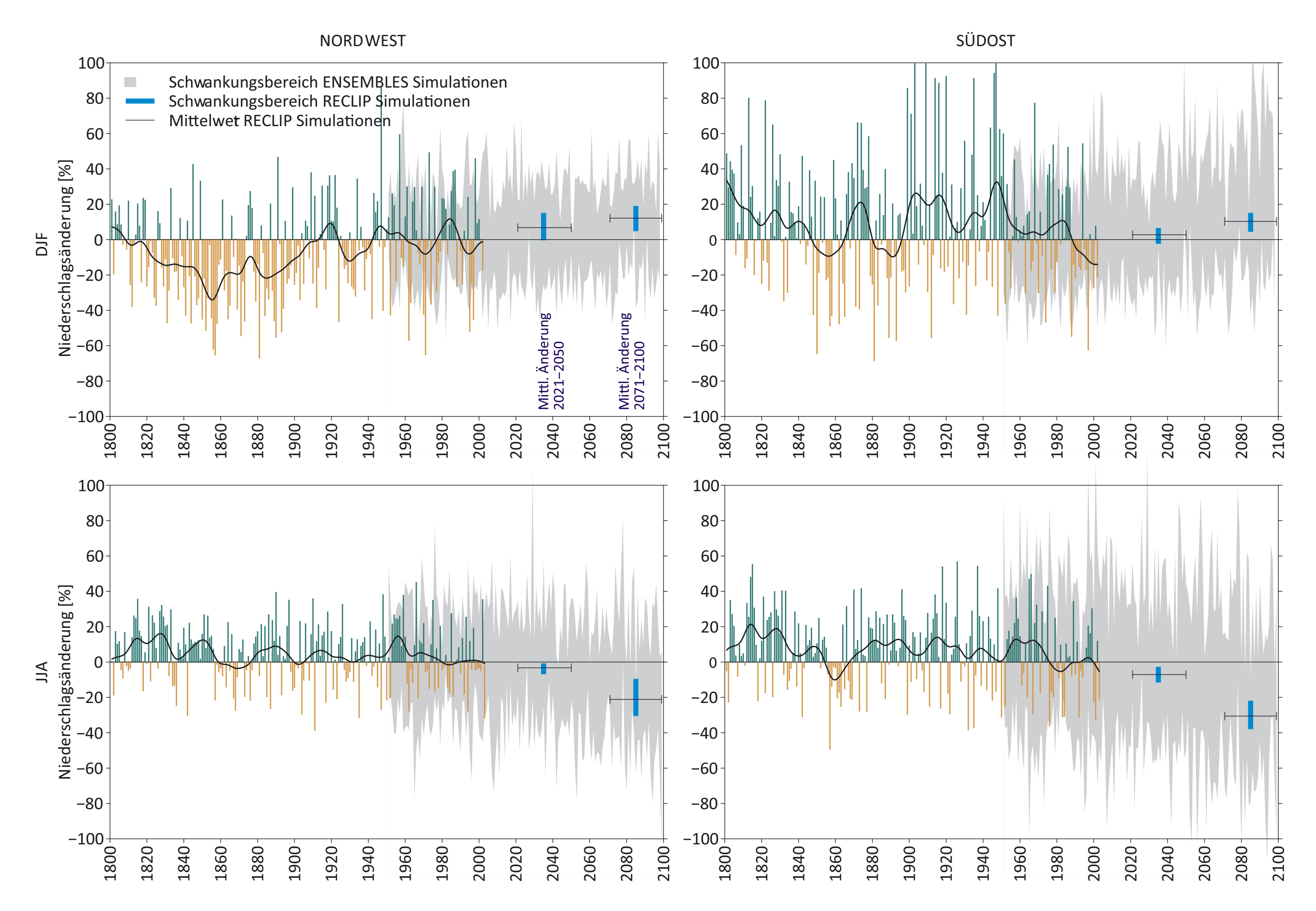


Abbildung 5.2 Niederschlagsentwicklung in Österreich seit 1800 aus instrumentellen Beobachtungen sowie die zu erwartende Niederschlagsentwicklung für die Zukunft bis 2100, dargestellt als Abweichung gegenüber dem Mittel 1971–2000). Die Abbildungen oben beziehen sich auf den Winter (DJF), die Abbildungen unten auf den Sommer (JJA), das gesamte Bundesgebiet wurde in zwei Regionen (Nord-West und Süd-Ost) unterteilt. Die Beobachtungsdaten für die Vergangenheit stammen aus der HISTALP Datenbank, die Szenarien für die Zukunft sind aus 22 Ensembles Simulationen (SRES A1B Szenario, Darstellung als graue Balken für Einzeljahre)[3] und aus reclip:century (SRES Szenarien A1B, A2 und B1, farbige Balken für die Zeitscheiben 2021–2050 und 2071–2100)[4]

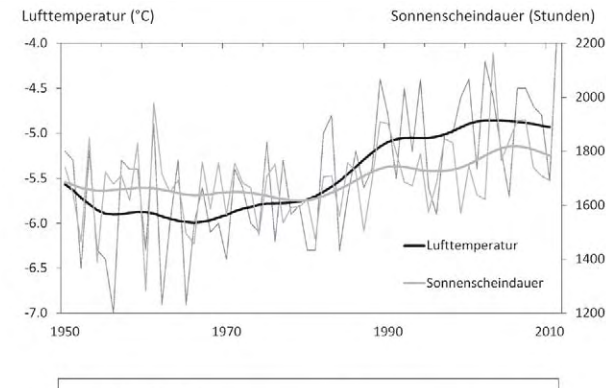
Figure 5.2 Precipitation development in Austria since 1800 (instrumental observations) and expected development for until 2100, shown as a deviation from the mean (1971–2000). Above figures show the winter season (DJF), the figures at the bottom the summer season (JJA), the region of Austria has been divided (north-west and south-east) into two regions. The observational data for the past come from the HISTALP database, scenarios for the future of the 22 ensemble simulations (SRES scenario A1B, grey bars for single years)[3] and from reclip: century (SRES scenarios A1B, A2 and B1, coloured bars for the time slices 2021, 2050 and 2071–2100)[4]

3 www.ensembles-eu.org

4 http://reclip.ait.ac.at/reclip_century

untersuchen. So zeigt etwa eine Untersuchung von Böhm et al. (1998), dass die Temperaturentwicklung der Hochgebirgsstationen der Alpen parallel zu jener der Tieflandstationen ist und auch mit der Entwicklung der Luftdruckänderung (Abnahme der Luftdichte und entsprechende Hebung der Druckniveaus) übereinstimmt. Es ist keine Höhenabhängigkeit der Temperaturtrends aus den instrumentellen Messungen erkennbar. Auer et al. (1998) zeigen eine wesentlich stärkere Zunahme der Sonnenscheindauer an Hochgebirgsstationen im Vergleich zu Tieflandstationen seit ca. 1950 und begründen das mit der zunehmenden Trübung der Atmosphäre durch zunehmende industrielle Prozesse.

Der im Sommer besonders augenfällige Temperaturanstieg am Hohen Sonnblick seit dem Beginn der 1980er Jahre (ca. +2 °C) geht einher mit einer deutlichen Zunahme der Sonnenscheindauer (Abbildung 5.3) und einer Erhöhung der Globalstrahlung – d. h. mit Veränderungen des primären Klimaantriebes. Dabei wird der mehrfache Einfluss des Menschen auf das Klima deutlich erkennbar: So ist zwar die Zunahme der Sonnenscheindauer mit dem generellen Anstieg des Luftdrucks



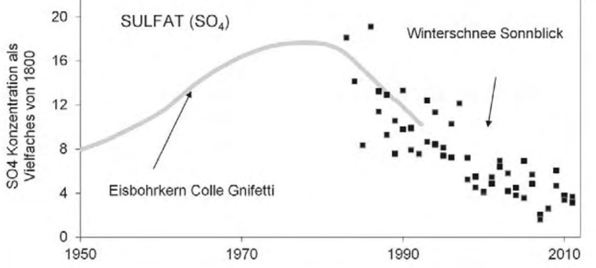


Abbildung 5.3 Oben: Zeitreihen der Jahresmitteltemperaturen (schwarze Linie) und der Jahressummen der Sonnenscheindauer (graue Linie) am Sonnblick für die letzten 60 Jahre sowohl für Einzeljahre (dünne Linie) als auch als gefilterte Zeitreihe (30jähriger Gaußfilter, dicke Linie). Datenquelle: ZAMG
Unten: Zeitreihen der mittleren Sulfatkonzentration in der Schneedecke am Sonnblick für die letzten 30 Jahre (schwarze Punkte) und Sulfatkonzentrationen an einem Firnkern vom Colle Gnifett in der Schweiz (graue Linie). Datenquellen: ZAMG, TU Wien, D. Wagenbach, persönliche Mitteilung

Figure 5.3 Top: Time series of annual air temperatures (black line) and annual hours of bright sunshine (grey line) measured at Sonnblick in the last 60 years, for individual years (thin line) and filtered values (30-years Gaussian filter, bold line) (Datasource: ZAMG)
Bottom: Time series of sulphate concentration in the snow cover for the last 30 years (black dots) and sulphate concentrations in a firn core from Colle Gnifetti in Switzerland (grey line). Data source: ZAMG, TU Wien, D. Wagenbach, personal communication

über dem Alpenraum durch einen Nordwärts-Verschiebung des subtropischen Hochdruckgürtels (siehe Band 1, Kapitel 3) zu begründen, der deutliche Anstieg der Globalstrahlung, der die Zunahme der Lufttemperatur mitverursacht, ist jedoch auch eine Folge des sogenannten „Global Brightening" (siehe z. B. Wild et al. 2005, Ruckstuhl et al., 2008). Maßnahmen zur Reinhaltung der Luft haben zur Abnahme insbesondere der Anzahl an Sulfataerosolen in der Luft geführt, und damit die Streuung der Sonnenstrahlung verringert. Es ist dies die Gegenentwicklung zum „Global Dimming". Die lange Zeitreihe der Sulfatmessungen in der Schneedecke am Sonnblick belegt dies sehr eindrucksvoll (Abbildung 5.3).

Aber der Einfluss des Menschen äußert sich natürlich vorwiegend durch die Wirkung der Spurengase auf die langwellige terrestrische Strahlung. Die Messungen vom Sonnblick

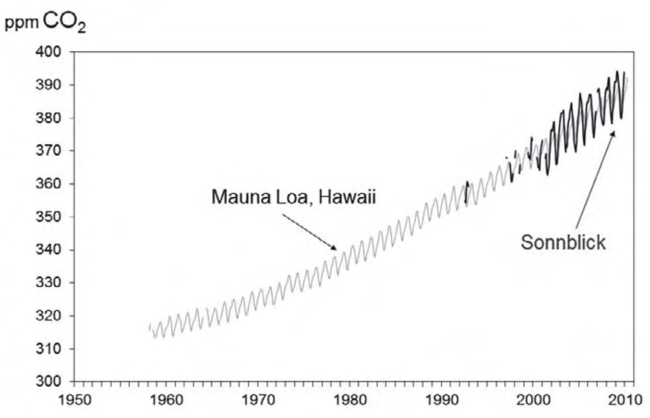


Abbildung 5.4 Zeitreihen des CO_2 am Sonnblick (schwarze Linie) im Vergleich zu den Messungen auf Mauna Loa (graue Linie) für die letzten 50 Jahre. Datenquelle: Böhm et al. (2011)

Figure 5.4 Time series of CO_2 at Sonnblick (black line) in comparison to the measurements at Mauna Loa (grey line) for the last 50 years. Source: Böhm et al. (2011)

zeigen den verursachenden deutlichen Anstieg des CO_2 (Abbildung 5.4). Aus dem Vergleich der CO_2-Messungen des Sonnblicks mit der berühmten Messreihe von Mauna Loa auf Hawaii kann man gut erkennen, dass der CO_2 Anstieg ein globales Problem ist – die lange Lebensdauer der CO_2-Moleküle in der Atmosphäre und die Durchmischung der Atmosphäre führen zu einem parallelen Anstieg der Zeitreihen.

Einen besonders eindrucksvollen Beleg für Klimaänderungen in den Alpen liefern die Gletscher. Der oben beschriebene, deutliche Anstieg der Globalstrahlung und die damit einhergehende starke Zunahme der Lufttemperatur im Sommer führen zu einen deutlichen Zunahme der sommerlichen Gletscherschmelze und stark negativen Massenbilanzen (Abbildung 5.5 unten). Die durch den Temperaturanstieg mitverursachte Abnahme der sommerlichen Schneefälle führt gleichzeitig zu verminderter Albedo und damit zu einer Verstärkung des Schmelzens. Die Folgen für die Hydrologie werden in Band 2 beschrieben. Spezifische Untersuchungen zum Sonnblick finden sich z. B. in Koboltschnig et al., 2009, Schöner und Böhm, 2007. Die in Abbildung 5.5 (oben) gezeigte, deutliche Zunahme des Regenniederschlags am Sonnblick ist ebenfalls für die Gletscher ungünstig, und darüber hinaus eine Ursache für den deutlichen Rückgang des Permafrostes am Sonnblick (Schöner et al., 2012). Das Sonnblickobservatorium ist nicht nur ein guter Standort für die Erfassung von Änderungen des Phänomens Permafrost sondern auch unmittelbar selbst betroffen vom Klimawandel. Für die Absicherung der vom schwindenden Permafrost bedrohten Standfestigkeit des Sonnblickgipfels waren zwischen 2003 und 2006 umfangreiche und kostspielige Stabilisierungsmaßnahmen notwendig.

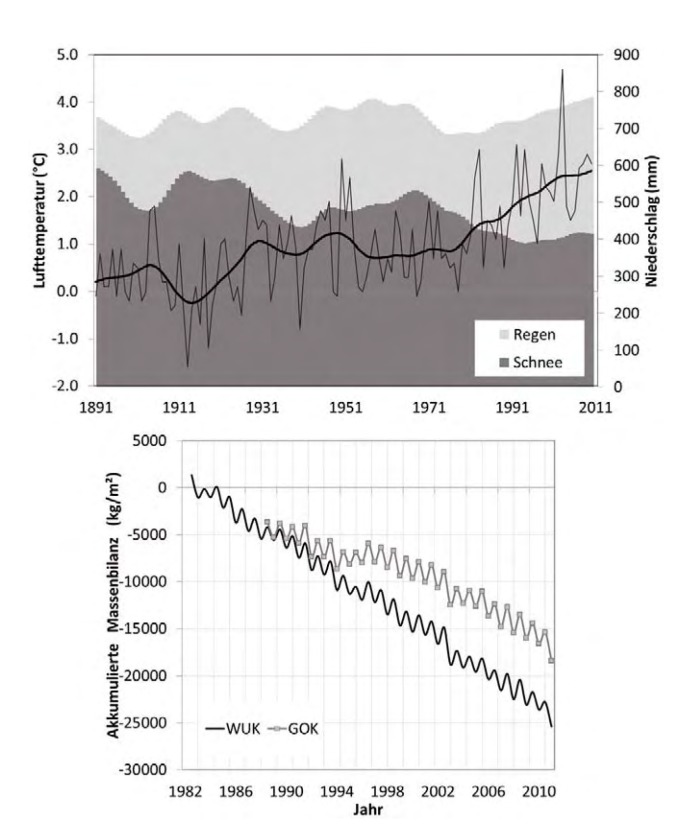


Abbildung 5.5 Oben: Zeitreihe der Lufttemperatur (schwarze Linie, dünn=Einzeljahre, dick=30jährig mittels Gaußfilter gefilterte Werte), des Niederschlags getrennt nach Regen (hellgrau) und Schnee (dunkelgrau) jeweils für den Sommer seit 1891. Unten: Akkumulierte Massenbilanzen der naheliegenden Gletscher Wurtenkees und Goldbergkees. Datenquelle: ZAMG

Figure 5.5 Top: Time series of air temperature (black line, thin=single years, bold=30 year Gaussian filtered values), of precipitation split into rain (light grey) and snow (dark grey) for the summer season since 1891. Bottom: Cumulative mass balance of nearby glaciers Wurtenkees and Goldbergkees. Data source: ZAMG

5.4.2 Klimaänderung in der Stadt Wien

Wärmeinsel in Wien

Städtische Räume werden von den sich verändernden klimatologischen Verhältnissen besonders stark beeinflusst. In dicht bebauten Siedlungsgebieten führen Oberflächenversiegelung und das Fehlen von Grünflächen und somit von Verdunstungsflächen zu einer höheren Durchschnittstemperatur. Dieser Effekt wird durch die hohe Wärmespeicherkapazität vieler Baumaterialien und zusätzliche Wärmequellen in Siedlungen, Gewerbe und Industrie verstärkt. Das führt zum Phänomen der sogenannten städtischen Wärmeinsel („Urban Heat Island"), welche als Temperaturunterschied zwischen der Stadt und der ländlichen Umgebung definiert ist (z. B. Oke, 1982; 1987). Der Wärmeinseleffekt ist von der Stadtstruktur und der Topographie abhängig und ist dem regionalen Klima überlagert. Die Auswirkungen der Städte auf das Klima reichen aber über die Beeinflussung der Temperatur hinaus und zeigen sich auch in der Strahlungs- und Wärmebilanz, den Strömungs- und Feuchtigkeitsverhältnissen sowie der Luftqualität.

Die beobachtete Temperaturerhöhung in Wien ist sowohl durch die Erwärmung des regionalen Klimas (Auer et al., 2003, 2007) als auch durch den verstärkten Wärmeinseleffekt zu erklären. Im Jahresmittel war im Zeitraum 1951–1980 die Temperatur des Stadtzentrums von Wien um 1 °C bis 1,5 °C höher als jene der Umgebung (Auer et al., 1989). Seit 1951 kann ein statistisch signifikanter Trend steigender Temperaturunterschiede zwischen der Stadt und dem Umland festgestellt werden (Böhm, 1979), der für die Periode 1951–1995 bis zu 0,6 °C (für die gesamte Periode) an einzelnen Stationen in Wien beträgt (Böhm, 1998). Als Ursache wurden Änderungen in der städtischen Morphologie und im Energieverbrauch genannt.

Weiters zeigen Messdaten der Lufttemperatur von Wien für die vergangenen Jahrzehnte eine Zunahme der thermischen Belastung im Sommer (Abbildung 5.6). Die Häufigkeitsverteilung der Tagesmaxima der Temperatur in den Sommermonaten hat sich deutlich zu höheren Temperaturen verschoben, ohne dass sich dabei das kalte Ende der Verteilung wesentlich verändert hätte.

Die Anzahl der Sommertage (Tage an denen die Maximumstemperatur größer oder gleich 25 °C ist) hatte ein Minimum während des ersten Weltkrieges mit weniger als 30 Sommertagen pro Jahr. In der ersten Dekade des 21. Jahrhunderts lag der Mittelwert der Sommertage in Wien (Station Hohe

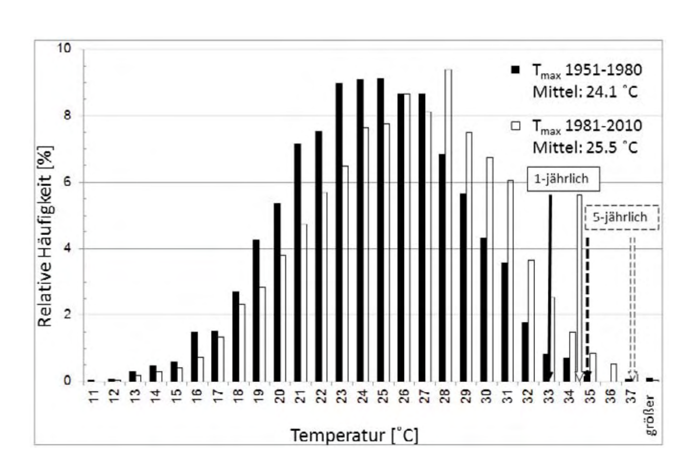


Abbildung 5.6 Häufigkeitsverteilung der Maximalen Sommertemperaturen an der Station Wien, Hohe Warte, in den Monaten Juni, Juli und August für die Zeiträume 1951 bis 1980 und 1981 bis 2010. Datenquelle: ZAMG

Figure 5.6 Frequency distribution of maximum of summer temperatures for station Wien, Hohe Warte, for the months June, July and August in 1951–1980 versus 1981–2010. Data source: ZAMG

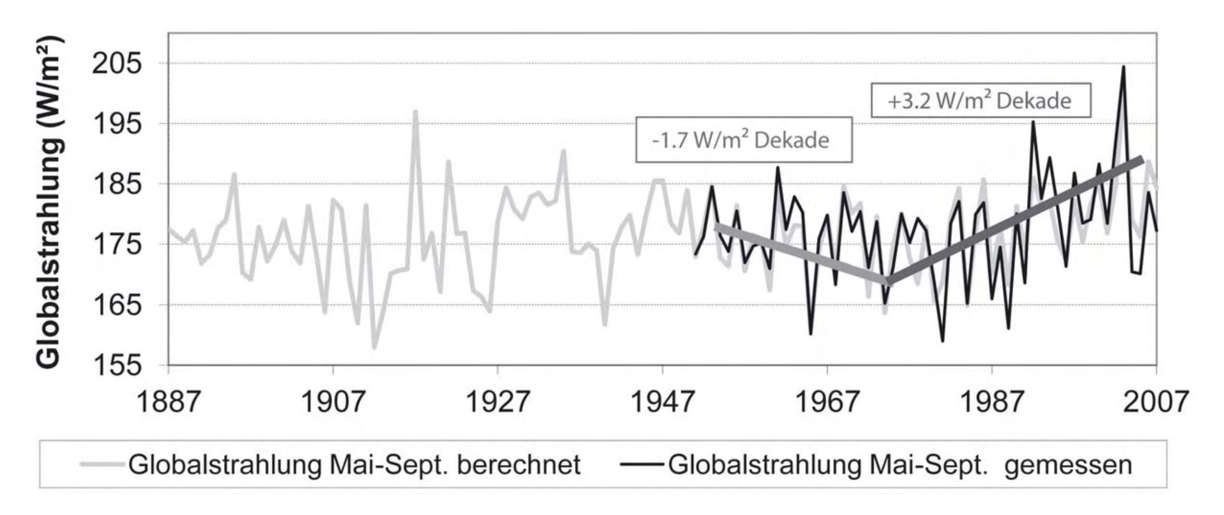


Abbildung 5.7 Zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung für die Periode Mai-September an der Station Wien, Hohe Warte, aus Messungen seit 1951 und mittels empirischer Formel berechnet aus der Sonnenscheindauer. Datenquelle: ZAMG

Figure 5.7 Global radiation averaged over the period May-September at station Vienna, Hohe Warte, from measurements since 1951 as well as empirically estimated from sunshine duration. Data source: ZAMG

Warte) bereits bei 64 Tagen pro Jahr. Im klimatologisch außergewöhnlichen Jahr 2003 wurden sogar über 100 Sommertage registriert.

Noch deutlicher wird die Auswirkung der Temperaturzunahme anhand der Häufigkeit von Hitzetagen, also Tagen mit Temperaturen über 30 °C, die im Zeitraum 1910 bis 2000 von ca. 2 auf 17 Tage gestiegen sind (Auer et al., 2003). Fünfjährliche Hitzeereignisse der Periode 1951 bis 1980 sind in der Periode 1981 bis 2010 zu einjährlichen geworden (vgl. Abbildung 5.6). Hitzetage werden jedoch nicht nur häufiger, sondern sie treten an der Station Wien Hohe Warte mit vergleichbarer Wahrscheinlichkeit auch etwa 15 Tage früher im Jahr auf (Piribauer und Strasser, 2010). Trotz der deutlichen Zunahme der Mittel- und Maximumstemperaturen seit ca. 1970 zeigt sich keine parallele Abnahme in der Anzahl der Frosttage (Auer et al., 2003).

Der Wärmeinseleffekt führt zu hohen Wärmebelastungen in den städtischen Räumen. Die nächtliche Abkühlung in Städten nimmt mit zunehmenden Temperaturen ab. In Wien stieg in der Periode 1985 bis 2005 die Zahl der Nächte, in denen die Temperatur nicht unter 16 °C gesunken ist, gegenüber der Referenzperiode 1961 bis 1990 um ein Drittel – von 30 auf 40 Nächte (Formayer et al., 2007). Die nächtliche Abkühlung ist während Hitzeperioden ein wesentlicher Faktor für die Erholung des Menschen von übermäßiger Wärmebelastung während des Tages (Thaler et al. 2005, 2008). Weitere Ausführungen zu den Auswirkungen erhöhter Temperaturen auf die Gesundheit finden sich im Band 2, Kapitel 6 und Band 3, Kapitel 5.

Besonders auffällig ist eine deutliche Zunahme der Sonnenscheindauer und Globalstrahlung in Wien seit ca. 1980 (Abbildung 5.7). Das beobachtete „Global Brightening" (Wild et al., 2005, Ruckstuhl et al., 2008) kann als Erklärung für die deutliche Zunahme der Globalstrahlung herangezogen werden.

Klimazukunft und Auswirkungen

Für die großen österreichischen Städte, insbesondere Wien, ist die infolge des Klimawandels zunehmende Hitzebelastung als eine wesentliche Herausforderung zu sehen. Die Analyse von Klimaszenarien aus regionalen Multimodell-Simulationen (Schär et al., 2004; Fischer und Schär, 2010) zeigt eine Erhöhung der Intensität und Häufigkeit der Hitzewellen in ganz Europa. Für Wien wurde mittels statistischem Downscaling ein Anstieg von 46 % auf 69 % Sommertage und von 10 % auf 24 % Hitzetage bis Ende des Jahrhunderts im Vergleich zu Klimanormalperiode 1961 bis 1990 errechnet (Formayer et al., 2009). Berechnungen, die auf dem regionalen REMO-UBA Klimamodell (Jacob et al., 2008) beruhen, zeigen für die Station Hohe Warte bis zur Mitte des Jahrhunderts einen moderaten Anstieg, danach aber eine deutlich raschere Zunahme hoher Temperaturen. In der Periode 2070 bis 2100 liegen die Werte bei den Hitzetagen im Mittel bei mehr als 35 Tagen, der 10-Perzentilwert bei nahezu 60 Tagen für das SRES A1B Szenario (Formayer et al., 2007). Andere, mit denselben Modellannahmen berechnete Temperaturindizes bestätigen verstärkte Auswirkungen des Klimawandels in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts. Bemerkenswert ist die Zunahme der sogenannten Kyselytage, einem Indikator für Hitzeperioden (Kyselý et al., 2000) und heiße Nächte (Temperaturen sinken nachts nicht unter 18 °C). Erstere versechsfachen sich etwa in der Pe-

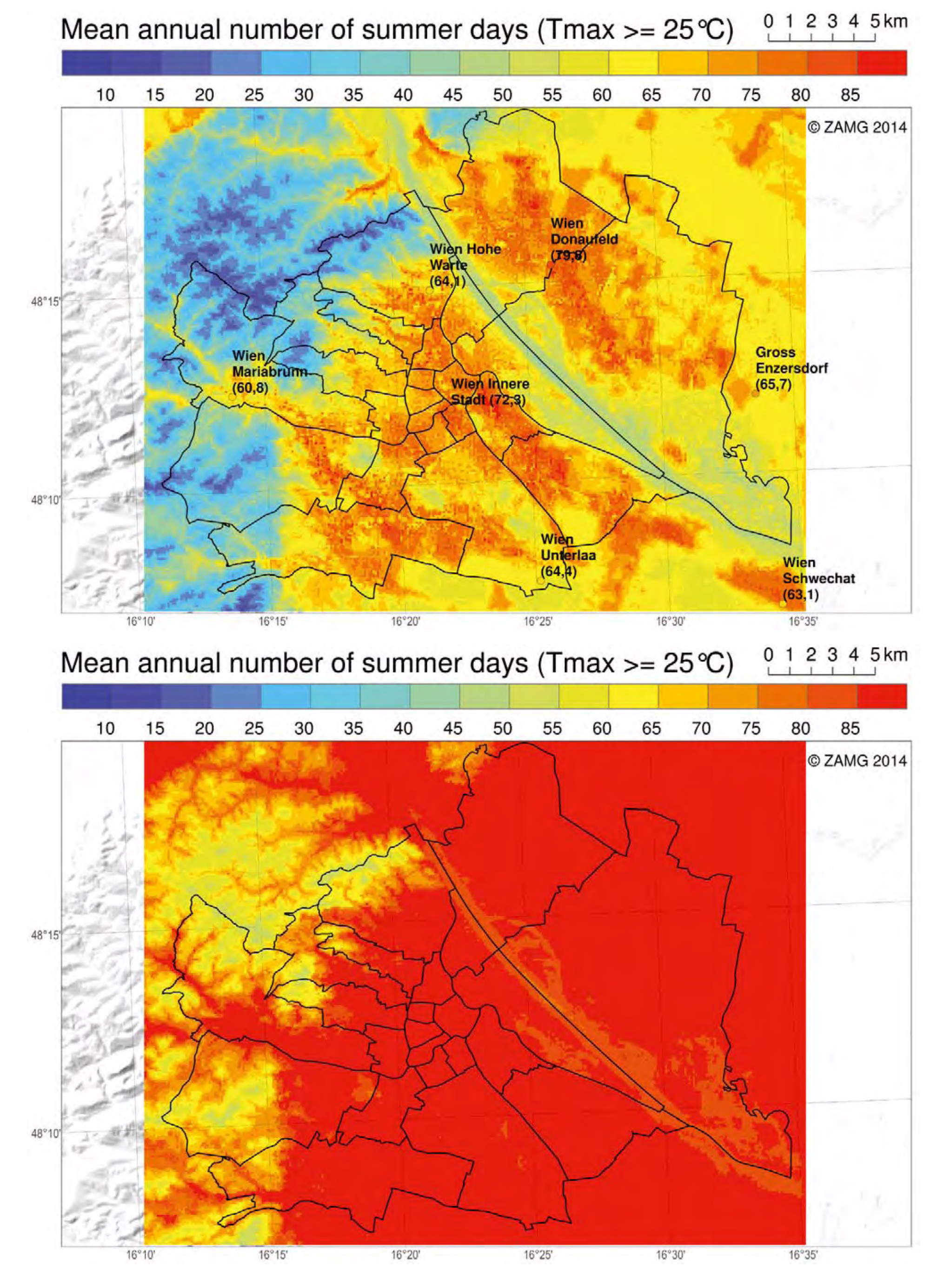


Abbildung 5.8 Mittlere Anzahl der Sommertage in Wien und Umgebung für die Zeitraum 1981 bis 2010 (links, beobachtet) und 2071 bis 2100 (rechts, mittels Stadtklimamodell MUKLIMO_3, Zuvela-Aloise, 2011). Zugrundeliegendes Klimaszenario: Cosmo-CLM basierend auf ECHAM5 IPCC Szenario A1B, Lautenschlager et al. (2009, 2011)

Figure 5.8 Mean number of summer days for the area of Vienna and surroundings for the period 1981-2010 (left, from observations) and 2071–2100 (right, modelled with model MUKLIMO_3, Zuvela-Aloise, 2011). Underlying climate scenario: Cosmo-CLM based on ECHAM5 IPCC Scenario A1B, Lautenschlager et al. (2009, 2011)

riode 2070 bis 2100 im Vergleich zur Periode 1960 bis 1990, letztere verzehnfachen sich sogar. In beiden Fälle ist der primäre Anstieg in der 2. Hälfte des Jahrhunderts zu verzeichnen.

In der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts könnte ohne Anpassungsmaßnahmen die hitzebedingte Mortalität um 129 % (Muthers et al., 2010) bis 200 % (Moshammer et al., 2006) gegenüber jener Ende des 20. Jahrhunderts steigen, vor allem durch extreme Hitze. Von der Hitzesterblichkeit besonders betroffen sind Frauen, ältere Menschen und Personen in „ärmeren" Bezirken. Das Sterberisiko unter Hitzeeinwirkung erwies sich für KrankenhauspatientInnen und für HeimbewohnerInnen gleich hoch wie für andere Personen; es dürften sich zwei Effekte überlagern – zum einen sind Menschen, die sich in Krankenhäusern und Heimen befinden großteils a priori geschwächt und daher für Zusatzbelastungen anfälliger, andererseits trägt das geschulte Personal in Krankenhäusern und Heimen zur Minderung des Risikos bei (Moshammer et al., 2009). Eine klare Schwelle, ab welcher die Sterblichkeit stärker ansteigt und daher Anpassungsmaßnahmen zu setzen wären, konnte nicht gefunden werden.

Die Indikatoren für den Energiebedarf zur Heizung (Heizgradtage, ÖNORM 8135) bzw. Kühlung (Kühlgradtage, Sailor, 2001) im Wohnbereich zeigen erwartungsgemäß gegenläufiges Verhalten: Die Heizgradtage sinken um etwa 30 %, die Kühlgradtage erhöhen sich um mehr als einen Faktor 2,5 bis zur Periode 2070 bis 2100 (Formayer et al., 2007, Prettenthaler und Gobiet, 2008).

Für die Biosphäre relevante abgeleitete Größen, wie etwa die Tage der Vegetationsperiode (FAO, 1996) oder die Gradtagssummen (Harlfinger und Knees, 1999) zeigen vergleichsweise geringe Änderungen seit 1960, lassen aber eine deutliche Zunahme in der 2. Hälfte dieses Jahrhunderts erwarten. Für die größte Grünfläche Wiens, den Wienerwald, ist im zeitlichen Verlauf ein klimabedingter Produktivitätsrückgang zu erwarten. Andere Vulnerabilitätsindikatoren, wie Vorrat oder Kohlenstoffspeicherung weisen geringere Veränderungen als die Produktivität auf und werden durch das jeweilige Bewirtschaftungskonzept stärker beeinflusst als durch den Klimawandel. Durch Anpassung der Bewirtschaftungsform können voraussichtlich die erwünschten Ökosystemleistungen im Biosphärenpark Wienerwald unter den erwarteten Klimawandelbedingungen aufrechterhalten werden (Schörghuber et al., 2012).

Die Landnutzungsmuster der Stadt (z. B. Verteilung von Grünflächen, Wasserflächen, Bebauungsdichte) bestimmen die räumliche Verteilung der zu erwartenden Wärmebelastung (Abbildung 5.8). In Zuvela-Aloise (2011) wurde ein Ensemble von Klimaprojektionen für die Stadt Wien mittels des Stadtklimamodells MUKLIMO_3 (Sievers, 1990; 1995) und der sogenannten Quadermethode (Früh et al, 2011a,b) berechnet, um die flächenhafte Verteilung der Wärmebelastung in Wien zu untersuchen. Die Ergebnisse zeigen für den Zeitraum 2021 bis 2050 wenig Änderung bis zu einer mäßigen Zunahme der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage (bis zu 20 Sommertage mehr). Bis Ende des Jahrhunderts ist aber (in Abhängigkeit des betrachteten Klimaszenarios) mit einer Zunahme von 20 bis 50 Sommertagen und mit einem größeren Anstieg der Hitzebelastung zu rechnen. Die räumliche Verteilung bleibt erhalten – die niedrigsten Temperaturen finden sich jeweils im Bereich des Wienerwaldes, des letzten Ausläufers der Alpen, und im unmittelbaren Donautal. Die meisten heißen Tage treten in den dicht verbauten inneren Bezirken und im flachen, schon pannonisch beeinflussten Osten Wiens auf.

Niederschlagsszenarien für den Raum Wien gehen analog der Entwicklung im Nordosten Österreichs von einer Abnahme des Niederschlags im Sommer und einer Zunahme im Winter aus, die umso ausgeprägter ausfallen, je extremer die Klimaszenarien sind (Damerau, 2008). Die Szenarienergebnisse für Strahlung und Wind sind mit wesentlich größeren Unsicherheiten behaftet, und insbesondere letztere sind auch stark von der Stadtentwicklung und Bebauung abhängig.

Modellexperimente in denen der Anteil der städtischen Parkflächen, der Wasserflächen oder der Bebauungsstruktur künstlich verändert wurden, zeigen deutlich den Einfluss der Landnutzung auf das Stadtklima von Wien (Zuvela-Aloise et al., 2013). Die dadurch veränderte Verdunstung und Albedo verändern die Strahlungsbilanz und die Windgeschwindigkeit. Dies hat beispielweise deutliche Auswirkungen auf die Anzahl der modellierten Sommertage (Zuvela-Aloise et al., 2013). Optionale städtebauliche Maßnahmen können damit recht gut auf ihre Klimawirksamkeit überprüft werden. Weitere Modellexperimente und Modellverbesserungen sind jedoch notwendig um die Ergebnisse operationell in die Stadtplanung einfließen lassen zu können.

Grün- und Freiräume können nicht nur dem Temperaturanstieg entgegenwirken. Sie können auch dazu beitragen, die Widerstandsfähigkeit von Städten gegenüber Extremereignissen zu steigern. Sie liefern mit ihrer abkühlenden und Wasser zurückhaltenden Wirkung bzw. verdunstenden Funktion einen zentralen Beitrag zum Temperatur- und Wasserhaushalt in der Stadt (Meinharter und Balas, 2011). Der Städtetourismus weist in Wien in den Sommermonaten (Juli, August) die höchste Anzahl an TouristInnen auf. Ein wachsender Anteil der TouristInnen gehört der Gruppe der 60–79-Jährigen an, die im Allgemeinen besonders hitzeempfindlich sind. Eine Befragung von TouristInnen zeigte, dass vor allem in den Bereichen Begrünung, Information von TouristInnen (z. B. Kennzeichnung von Trinkbrunnen und kühlen Orten in Stadtplänen, Bereitstellung hitzeadäquater Besichtigungstipps in den Unterkünften und über Internet-Applikationen) sowie Weiterbildung von TouristikerInnen Handlungsbedarf gegeben ist (Allex et al., 2011).

Um die Wärmebelastung zu minimieren, ist es notwendig städtebauliche Maßnahmen unter Berücksichtigung klimatologischer Aspekte im Vorfeld einzuplanen (Kromp-Kolb et al., 2007; Mursch-Radlgruber et al., 2009; Loibl et al., 2011; Zuvela-Aloise et al., 2013). Aus meteorologischer Sicht sollten klimagerecht geplante Städte der Zukunft u. a. folgende Eigenschaften aufweisen:

- Gute Wärmedämmung der Gebäude und ausreichend Verschattungsmöglichkeiten;
- Begrünung von Dach-, Fassadenflächen und Straßenraum zur Reduktion von Oberflächentemperaturen;

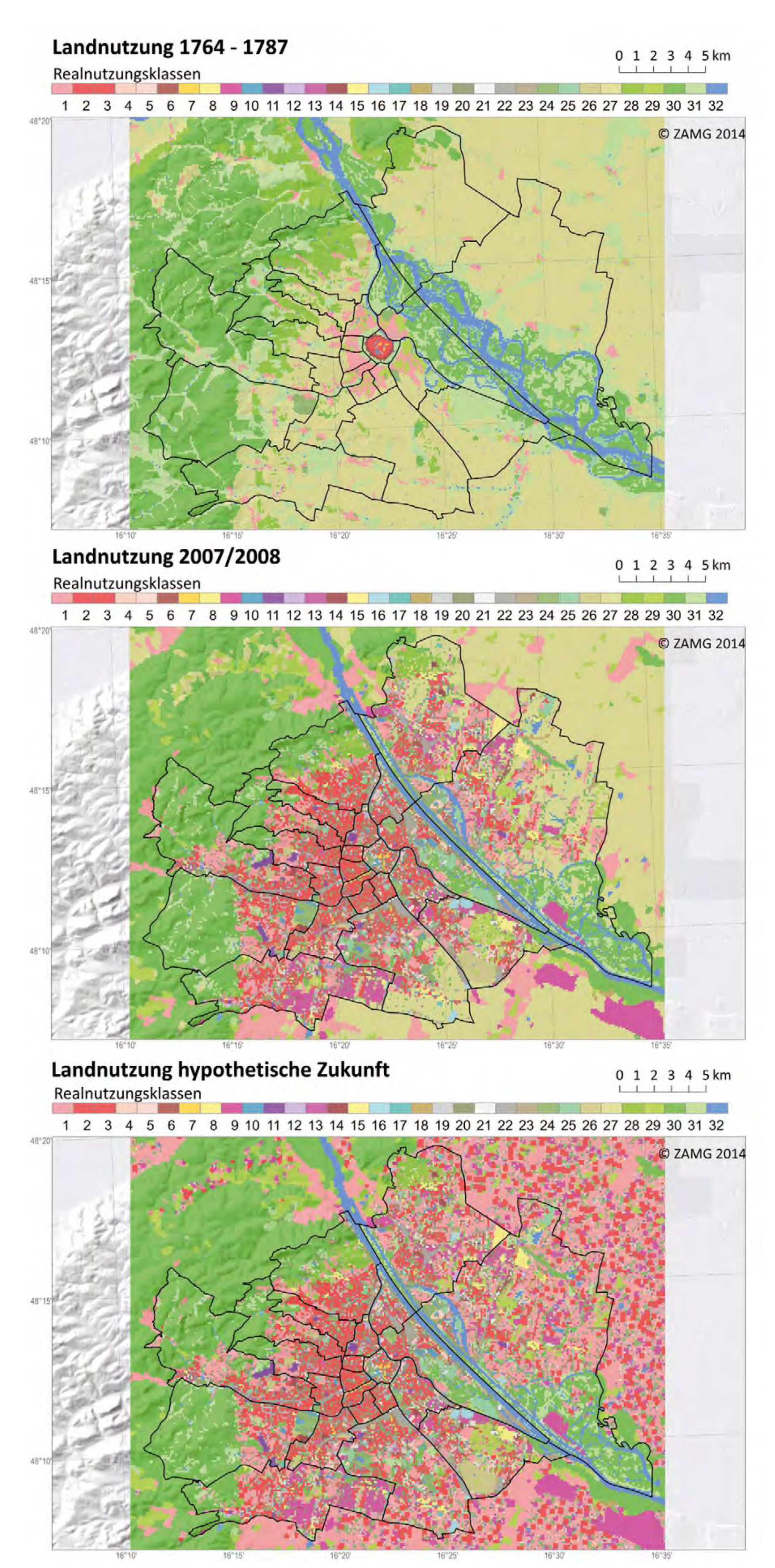


Abbildung 5.9 Landnutzungskarten von Wien und Umgebung. Oben: Digitalisierte historische Landkarte der Ersten Josephinischen Landesaufnahme von 1764 bis 1787 (ÖSTA, Erste Landesausfnahme, Digitalisierung: ZAMG). Mitte: Heutige Landnutzung, erstellt aus Landnutzungsdatensätzen der MA18[5] und satellitenbasierten Landnutzungsdaten (Steinnocher, 1996). Unten: hypothetische Entwicklung der Stadt mit neuen Bebauung in der Süd-Ost Region und Verdichtung der bestehende lockeren (Misch) Bebauung. Die Realnutzungsklassen sind in 4 Typen geteilt: Baulandnutzung (1–18), Straßen und Verkehr (19–23), Grünlandnutzung (24–31) und Wasser (32). Der historische Datensatz unterscheidet 14 Landnutzungsklassen. Quelle: ZAMG

Figure 5.9 Landuse maps of Vienna and surroundings. Top: Digitized historical map of the first topographic survey „Erste Josephinische Landesaufnahme" 1764 to 1787 (ÖSTA, Erste Landesaufnahme, Digitized by ZAMG) Center: Todays landuse derived from landuse data of MA18[5] and satellite based data (Steinnocher, 1996). Bottom: Hypothetical development of landuse for Vienna area with densification of existing loosely built-up area in the South-East region of the city. Landuse classes are divided into 4 types: built-up areas (1–18), streets and traffic (19–23), vegetation (24–31) and water (32). Historical dataset differentiates 14 landuse classes. Source: ZAMG

[5] http://www.stadtentwicklung.wien.at

- Bei fehlendem Grün, helle Oberflächen zur Erhöhung der Albedo (Reduktion der Absorption von Strahlung);
- Kompakte, aber belüftungswirksame Bebauungsstrukturen.

Detaillierte Ausführungen zu Anpassungsmaßnahmen in Städten finden sich in Band 3.

Klimawandel und Urbanisierung

Zuzüglich zur regionalen Klimaänderung ist zu erwarten, dass die Entwicklung der Stadt zu weiterer Urbanisierung führt. Aufgrund der Tendenz zur Verdichtung existierender Bebauung und der Urbanisierung der benachbarten, ländlichen Flächen kann sich in Zukunft der Wärmeinsel-Effekt noch verschärfen. Dies kann bedingen, dass die exzessive Hitze in städtischen Bereichen noch größer wird, als aus den Klimaszenarien zu erwarten.

Die städtische Entwicklung Wiens ist in Abbildung 5.9 illustriert. Historische Landkarten der Stadt Wien und Umgebung vom Ende des 18. Jahrhunderts (ÖSTA, Erste Landesaufnahme) zeigen enorme Unterschiede zur heutigen Stadtstruktur. Der historische Kern der Inneren Stadt ist weitgehend unverändert geblieben, aber die Umgebung wurde stark verbaut. Die alte lockere Bebauung wurde verdichtet und die Donau reguliert. Große Teile der ehemalige Weingärten und landwirtschaftlichen Flächen gehören heute zu den suburbanen Wohn(misch)gebieten.

Die Urbanisierung Wiens erfolgt derzeit hauptsächlich am südlichen und östlichen Stadtrand, während der Stadtentwicklungsplan eine Fortsetzung dieses Trends im Osten vorsieht. Die noch zur Verfügung stehenden Flächen in den unmittelbar angrenzenden Gebieten im Süden und im Norden werden in absehbarer Zeit verbaut sein. Wien hatte 2011 eine Einwohnerzahl von 1,75 Mio., das sind 20 % der österreichischen Bevölkerung. Etwa 2030 könnte die 2-Millionengrenze überschritten werden und bis Mitte des 21. Jahrhundert die Bevölkerung auf ca. 2,14 Millionen angewachsen sein (Statistik Austria, 2012). Ein gutes Fünftel davon wäre wahrscheinlich über 65 Jahre alt, eine Bevölkerungsgruppe für die Hitze besonders belastend ist. Die aus dem Klimawandel ableitbare künftige Zunahme der Hitzebelastung könnte sich zu einer besonderen Herausforderung der Städteplanung entwickeln.

Studien zur Entwicklung des Klimas in Wien unter Berücksichtigung der Stadt-, Bevölkerungs- und Wirtschaftsentwicklung liegen derzeit nur in geringer Anzahl vor. Damerau (2008) untersuchte drei mögliche Entwicklungsszenarien für Wien, angelehnt an die SRES-Szenarien A2, A1 sowie B1 und fand trotz nur geringfügig unterschiedlich angenommener Entwicklungsraten im Energiebereich wesentliche Divergenzen in der Entwicklung. Angesichts der Langfristigkeit städtischer Planungen und der Langlebigkeit von Baumaßnahmen sollten Untersuchungen in diesem Bereich im prioritären Interesse der Stadt Wien liegen. Je später Entscheidungen für eine klimafreundliche Entwicklung fallen, desto schwieriger gestalten sich die erforderlichen Umstellungen, da sie durch früher getroffene Entscheidungen behindert werden können, sogenannte Lock-in Effekte (Nakicenovic, 2003).

5.4.3 Klimaänderung und Seen – Der Neusiedlersee

Der Neusiedler See ist einer der wenigen Steppenseen Europas. Er zeichnet sich durch seinen Schilfgürtel, seine geringe Tiefe sowie durch sein mildes und windiges Klima aus. Er bestimmt das Landschaftsbild des östlichen Burgenlandes, begünstigt das regionale Klima und wird durch Tourismus, Wassersport, Schifffahrt und Fischerei genutzt. Der einzigartigen Fauna und Flora dieser historischen Kulturlandschaft tragen die Nationalparks Neusiedlersee-Seewinkel und Fertő-Hanság sowie die Ernennung zum UNESCO-Welterbe mit der Bezeichnung Kulturlandschaft Fertő/Neusiedlersee Rechnung.

Periodisches Austrocknen zählt zu den Charakteristika eines Steppensees. Der Neusiedlersee trocknete im 18. und 19. Jahrhundert je zweimal aus, zuletzt von 1864 bis 1870. Die anthropogenen Einflüsse auf den Wasserhaushalt des Sees, insbesondere die umfangreichen Drainagemaßnahmen zur Urbarmachung des ehemals weitläufigen Sumpfgebietes im Süden des Sees, führten zu maßgeblichen Änderungen im hydrologischen System.

Durch die Inbetriebnahme einer Wehranlage im Jahr 1965 zur Regulierung der Ableitungsmengen in den Hanságkanal, der den See über das Ikva Rabnitz Flusssystem mit der Moson-Donau verbindet, konnte der mittlere Seewasserpegel signifikant angehoben werden. Trotz der menschlichen Eingriffe unterliegt der Wasserhaushalt des Sees im Wesentlichen natürlichen Einflüssen, die stark klimaabhängig sind. Im Mittel stammen 79 % der Wassereinträge in den Neusiedlersee vom Niederschlag, 14 % von der Wulka, 5 % von anderen, kleineren Gewässern, 1 % aus dem Grundwasser und weniger als 1 % aus Abwasseranlagen. Die Verluste des großen, seichten Sees gehen zu 90 % auf Verdunstung zurück und 10 % werden über den künstlichen Kanal abgelassen (Soja et al., 2013).

Das Klima rund um den Neusiedler Sees wird nachweislich von diesem beeinflusst. Der See mit seiner ca. 300 km^2 großen Wasserfläche dämpft die Extremwerte der Temperatur. Die mittleren Maxima sind bei den seenahen Stationen im Som-

mer bis zu 2 °C, im Winter bis zu 1 °C niedriger, die mittleren Minima dagegen im Sommer bis zu 2 °C und im Winter bis zu 1 °C höher. Die Anzahl der Frosttage war an den Uferstationen gegenüber der Umgebung um 10 Tage, die der heißen Tage um 5 Tage vermindert (Dobesch und Neuwirth, 1974; Dobesch und Neuwirth, 1982).

Im Zeitraum 1966 bis 2007 sind Temperaturen und Niederschläge im Gebiet des Neusiedlersees tendenziell gestiegen. Die geringfügig niedrigeren Niederschläge des Zeitraumes 1997 bis 2004 bei steigender Temperatur führten zu kontinuierlich sinkenden Wasserständen. Der niedrige Seewasserstand im Jahr 2003, verursacht durch einen extrem niedrigen Jahresniederschlag und hohe Luft- und Wassertemperaturen, ließ die Frage aufkommen, ob unter zukünftigen Klimabedingungen wieder eine Austrocknung des Sees zu erwarten sei.

Eitzinger et al. (2009) simulierten zur Beantwortung dieser Frage mittels eines hydrologischen Seemodells den Seepegel in Abhängigkeit von meteorologischen Daten. Die Sensitivität hinsichtlich des Jahresniederschlags ist hoch: Bereits geringfügige Änderungen von 5 bis 10 % des Niederschlages haben unter den derzeitigen Klimaverhältnissen einen deutlichen Effekt auf die Auftrittswahrscheinlichkeit von Niedrigwasserständen. Bei einer ständigen Aufeinanderfolge des extrem trockenen Jahres 2003 (ca. 40 % des Jahresniederschlages des Mittels 1961 bis 1990) würde der See nach 4 bis 6 Jahren weitgehend austrocknen. Die Sensitivität wird bei höheren Temperaturen wegen der zunehmenden Verdunstung noch verstärkt.

Berechnungen für Klimaszenarien mit einer mittleren Temperaturerhöhung von 1,9 °C (2020er Periode) bzw. 2,5 °C (2040er Periode) mit künstlich generierten Wetterdaten (Wettergenerator) ergaben bei Erwärmung um 2,5 °C eine Erhöhung der Verdunstung um mehr als 20 %. Um diesen Wasserverlust zu kompensieren, müssten die Niederschläge ebenfalls um etwa 20 % zunehmen. Vorliegende Klimaszenarien lassen dies als unwahrscheinlich erscheinen. Nach den Modellberechnungen weisen niedrigere Seewasserpegel daher höhere Auftrittswahrscheinlichkeiten auf. Geht man z. B. vom Pegel 115 m Seehöhe ü. A. aus, so wird dieser in der Periode 1961 bis 1990 alle 250 Jahre unterschritten, in der Periode 1991 bis 2004 bereits alle 71 Jahre, in den Szenarien für 2020 und 2040 aber schon alle 7 bzw. 3 Jahre (Eitzinger et al., 2009). Ein wesentliches Ergebnis dieser Analysen war, dass der Wasserstand des Sees durch die wasserwirtschaftlichen Maßnahmen bei durchschnittlichen Niederschlägen zwar weitgehend stabilisiert werden kann, eine Reihe trockener Jahre aber zu sehr niedrigen Seewasserständen bis hin zur Austrocknung führen kann. Die Wehranlage kann im Mittel höhere Pegel aufrechterhalten, aber letztendlich eine Austrocknung nicht verhindern.

Die Sorge um das potentielle Austrocknen des Neusiedlersees löste die Entwicklung von Konzepten zur Sicherung eines Mindestpegelstandes aus, weil Ökologie und Wirtschaft des Seewinkels in vielerlei Hinsicht an die Existenz des Neusiedlersees gebunden sind. Aus der spezifischen hydrologischen Situation des Neusiedlersees geht hervor, dass Austrocknung nur durch Zufuhr zusätzlichen Wassers zu verhindern wäre. Dafür käme Uferfiltrat von der Donau oder Wasser von der Raab, von ungarischer Seite, in Frage. Um den Seespiegel um 1 mm anzuheben ist allerdings eine Wassermenge von etwa 300 000 m³ erforderlich (Donauuferfiltrat müsste auf ein 30 m höheres Niveau gepumpt werden – eine energieintensive Lösung). Die Raab hingegen hat gerade wenn der Neusiedlersee Wasserzufuhr bräuchte, selbst zumeist geringen Abfluss. Zusätzlich wurden ökologische Folgen der Zufuhr von Wasser mit anderer Nährstoffen und geringerer Salzfracht in den eher salzhaltigen Neusiedlersee diskutiert.

Selbst ein Absinken des Seepegels kann beträchtliche wirtschaftliche Auswirkungen haben (Schönerklee et al., 2008). Mit Hilfe eines digitalen Geländemodells des Neusiedlersees (Bácsatyai et al., 1997) wurde eine GIS Analyse der räumlichen Verteilung der Wassertiefen für unterschiedliche Wasserstände durchgeführt. Es wird ersichtlich, dass für Seepegel von 115,00 m Seehöhe ü.A. und 114,70 m Seehöhe ü.A. große Teile des Sees nur mehr sehr geringe Tiefen unter 1,2 m aufweisen.

Für Seepegel unter 115 m Seehöhe ü.A. errechneten Schönerklee et al. (2008) Einnahmenverluste von etwa 13 Mio € und den Verlust von etwa 480 Arbeitsplätzen in der Region. Bei einem Absinken des Pegels um weitere 30 cm, könnten die wirtschaftlichen Verluste das Dreifache erreichen und die Arbeitsplätze sich um das 2,5-fache reduzieren. Dies obwohl sich TouristInnen bei einer Befragung im Jahr 2006 nach der Methode des „Discrete Choice Experiments" (kurz DCE) als eher unsensitiv gegenüber dem Wasserstand erwiesen (Pröbstl et al., 2007). Während Wochenendgäste in erster Linie die angebotenen Sportaktivitäten und Infrastruktur (Baden in See und Swimmingpool) als wichtig beurteilten, sind für UrlauberInnen vor allem die Landschaftsattribute des Wasserstandes und Naturerlebnisangebotes, sowie Kultur- und Weinerlebnis die wichtigsten Beurteilungskriterien. Die Wirkung geringerer Seepegel ist stark vom Landschaftstyp am Ufer (z. B. mit Schilfzone oder offenes Ufer, Schotterstrand) abhängig. Natur-Interessierte zeigen deutlich stärkere Reaktionen auf die vorgelegten Bilder von hypothetischen Wasserstandsänderungen.

Anpassungsstrategien könnten die Diversifizierung des Tourismusangebotes und die zeitliche Erstreckung des Angebotes in den Frühling und Herbst, die weniger von Niedrigwasser bedroht sind, beinhalten. Jedenfalls wäre ein Maßnah-

menbündel erforderlich, das neben dem Tourismus auch die Landwirtschaft und die Wasserwirtschaft umfasst (Schönerklee et al. 2008, Pröbstl et al., 2007).

5.4.4 Die Bedeutung des Mittelmeeres für das Klima in Österreich

Das Klima in Österreich ist wegen der geographischen Lage und dem Einfluss der Alpen sehr vielfältig. Hier treffen drei bedeutende Klimazonen aufeinander: Von Westen das feuchtmilde atlantisch geprägte Klima, von Osten das trockenere kontinentale Klima und von Süden das Mittelmeerklima. Zusätzlich verändern die Erhebungen der Alpen das Klima. So treten zum Beispiel Stau- und Abschattungseffekte des Niederschlags auf, regionale Wind-, Temperatur- und Feuchtefelder werden verändert, die sommerliche Gewittertätigkeit wird begünstigt und sogar Tiefdruckgebiete verändern unter dem Einfluss der Alpen ihre Zugbahn oder entstehen erst durch ihren Einfluss.

Einfluss des Mittelmeeres

Das Mittelmeer und in Bezug auf Österreich insbesondere die nahe gelegene Adria, kann Luft durch Verdunstung rasch mit Feuchtigkeit anreichern. Wird diese feuchte Luft in weiterer Folge in den Alpenraum transportiert, kommt es dort zu erheblichen Niederschlagsmengen (Řezáčová et al., 2005; James et al., 2004; Rudari et al., 2004; Zängl, 2004). Das ist insbesondere im Herbst im Süden Österreichs von Bedeutung, da über dem noch warmen Mittelmeer viel Wasser verdunstet und feuchte Luftmassen durch rege Tätigkeit von Tiefdruckgebieten häufig gegen die Alpen strömen. Südlich des 47. Breitengrads beträgt die Niederschlagssumme im Oktober daher durchschnittlich das 1,3 bis 1,6-fache des Mittelwerts aller Monate des Jahres. Auch für Neuschnee und damit für den Wintertourismus auf der Alpensüdseite ist das Mittelmeer von Relevanz, da hier Schneefälle im Spät-Herbst und Frühwinter oft durch Tiefdruckgebiete aus dem Mittelmeer ausgelöst werden.

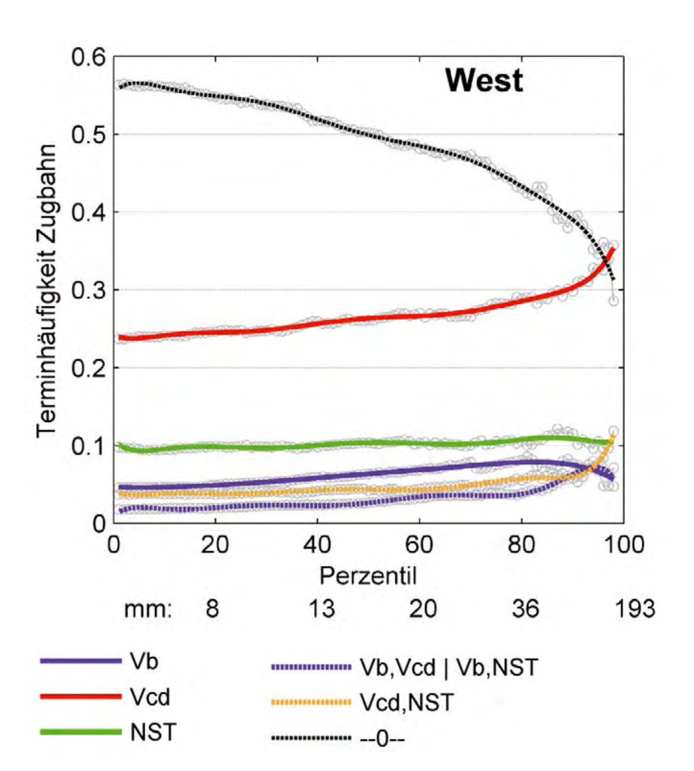
Besonders wichtig sind Tiefdruckgebiete aus dem Mittelmeer für extreme Niederschlagsereignisse in Österreich. Dabei haben die Zugbahnen der Tiefdruckgebiete eine besondere Bedeutung (van Bebber 1882 und 1891; van Bebber und Köppen 1895). In seiner Arbeit benannte Van Bebber jene Tiefdrucksysteme, die von Genua ausgehend über Ostösterreich nach Polen ziehen, als „Vb", jene die von Genua nach Osten ziehen als „Vc" und solche die nach Südosten ziehen als „Vd". Diese Tiefdrucksysteme können zu Hochwässern in Mitteleuropa führen (Mudelsee et al., 2004; Malitz und Schmidt, 1997). Viele verheerende Hochwässer der Vergangenheit wurden mit Vb-artigen Zugbahnen in Verbindungen gebracht, so auch die Ereignisse im Juli 1997 (Kundzewicz et al., 2005), im August 2002 (z. B. Grazzini and Van der Grijn, 2002; Ulbrich et al., 2003; Rudolf und Rapp, 2003; Habersack und Moser, 2003) oder im August 2005 (z. B. Godina et al., 2006; Habersack und Krapesch, 2006).

Die Besonderheit dieser Wettersysteme liegt aber nicht nur im Transport feuchter Luftmassen in den Alpenraum, sondern auch in anderen Charakteristika begründet (Hofstätter und Böhm, 2011), wie z. B. in der geringen Verlagerungsgeschwindigkeit, der Langlebigkeit und der dynamischen Regeneration der Tiefdruckgebiete (Sekundärzyklogenese in Mesinger und Strickler 1982; Pichler und Steinacker, 1987) sowie in der orographischen und konvektiven Verstärkung der mit Wetterfronten verbundenen Niederschläge. Für Niederschlag im Alpenraum mit Herkunft der atmosphärischen Feuchte aus dem Mittelmeer stammt diese großteils aus dem westlichen Teil des Mittelmeeres. Der Feuchtebeitrag aus den Wasserflächen der nördlichen Adria hingegen ist auf die Gebiete von der Po-Ebene bis hin zum Alpenostrand beschränkt (Schicker et al., 2010). Dies unterstreicht die Bedeutung des Mittelmeeres für das Hochwasserrisiko in Mitteleuropa.

Die Analyse der oben beschriebenen Zugbahnen von Tiefdruckgebieten im Alpenraum in Kombination zeigt einen regional unterschiedlichen, aber deutlichen Zusammenhang mit Niederschlagsintensitäten (Hofstätter und Chimani, 2012). Für diese Analyse wurden die Zugbahnen aus der zeitlich- / räumlichen Verlagerung der Zentren von Tiefdruckgebieten mittels ERA-40 Daten bestimmt und großräumige (Gebietsdefinition nach Seibert et al., 2007) und voneinander unabhängige Niederschlagsereignisse aus dem Zeitraum 1963 bis 2002 betrachtet (Abbildung 5.10).

Für den westlichen Teil Österreichs (Tirol, Vorarlberg, Salzburg) zeigt sich dabei, dass besonders Zugbahnen des Typs Vc und Vd (dunkelrote Linie in Abbildung 5.10) für starke Niederschläge von Bedeutung sind. Im östlichen Teil Österreichs (Niederösterreich bis Oststeiermark) sind Vb-Zugbahnen (blaue Linien) von besonders hoher Relevanz für starke Niederschläge. Beim 98. Niederschlagsperzentil beträgt der Anteil von Vb-Zugbahnen über 45 %.

Eine weitere Studie auf Basis der ERA40-Reanalyse (Awan und Formayer, 2012) stellt ebenfalls eine Verbindung zwischen großräumigen Starkniederschlägen und Vb-Tiefdruckgebieten her. Österreich zählt nach dieser Studie zu den am stärksten gefährdeten Regionen für extreme Niederschläge in Zusammenhang mit Vb Tiefdruckgebieten. Besonders relevant für Österreich sind dabei Tiefdruckgebiete die zentriert über den Alpen zu liegen kommen.



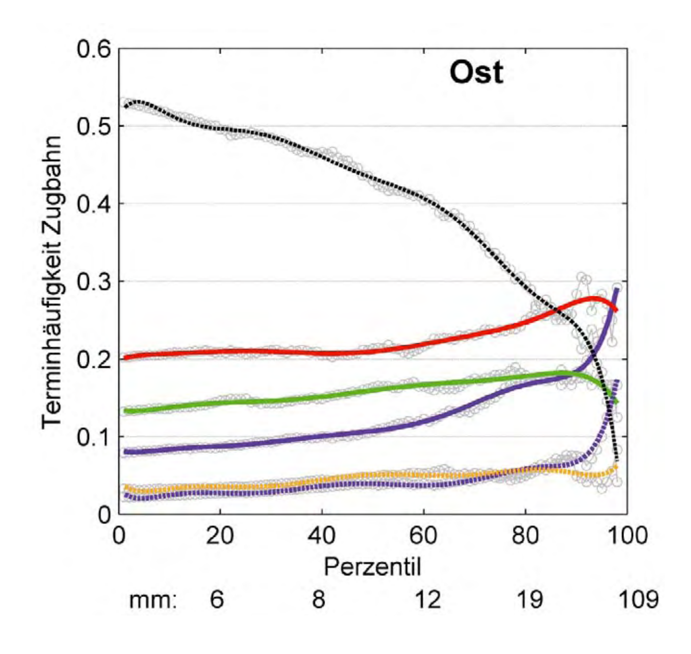


Abbildung 5.10 Relative Häufigkeit von verschiedenen Zugbahntypen bei Auswertung unabhängiger Niederschlagsereignisse für 1963 bis 2002 für die Gebiete „West" und „Ost" nach der Klassifikation von Seibert et al. (2007). Legende: Vb=Vb Zugbahn, Vcd=Vcd Zugbahn, NST=Tief über dem Alpenraum, 0= andere Typen. Quelle: Hofstätter und Chimani (2011)

Figure 5.10 Relative frequency of various track types „Zugbahnen" from the interpretation of independent precipitation events for the period 1963 to 2002 for the subregions „West" and „East" according to the classification of Seibert et al. (2007). Legend: Vb=Vb track, Vcd=Vcd track, NST=Low over the Alpine region, 0= other types. Source: Hofstätter und Chimani (2011)

Als weiterer Einfluss des Mittelmeeres auf das Wetter und Klima in Österreich ist die besonders gewitterträchtige Südwest-Wetterlage zu nennen, bei der warmfeuchte Luftmassen aus dem Bereich der Subtropen, auch unter Anfeuchtung über dem Mittelmeer, von Südwesten her nach Österreich geführt werden. Derartige Wetterlagen sind häufig mit Gewittern und konvektiven Starkniederschlägen verbunden, die in der Vergangenheit immer wieder zu lokalen Hangrutschungen und Vermurungen – wie beispielsweise im Juli 2012 – geführt haben. Auch das menschliche Wohlbefinden wird bei solchen Wetterlagen durch die schwüle Witterung beeinträchtigt.

Klimazukunft

Die oben beschriebene Vielfalt und Besonderheit der meteorologischen Phänomene sind nicht nur herausfordernd für die Messung und statistischen Beschreibung des Klimas, sondern bringen auch Klimamodelle rasch an die Grenzen ihrer Leistungsfähigkeit. Lange war zum Beispiel das Mittelmeer aufgrund von physikalisch-numerischen Beschränkungen und einer relativ groben räumlichen Auflösung nur unzureichend in den regionalen Klimamodellen abgebildet.

Seit etwa 2008 wird jedoch an der Entwicklung einer neuen Modellgeneration gearbeitet, bei der das Mittelmeer in seiner Gesamtheit in Klimasimulationen berücksichtigt wird (z. B. Sevault et al., 2009), sodass eine wesentlich besseren Abbildung der beobachteten Energie- und Masseflüsse zwischen Atmosphäre und dem Mittelmeer erzielt werden kann (Dubois et al., 2012). Simulationen mit diesen Modellen zeigen eine Reduktion des mittleren Niederschlags im Mittelmeerraum um 10–15 % in der Klimazukunft um 2050 (Emissionsszenario A1B). Wie sich die verbesserte Modellgüte auf die Abbildung von für Österreich relevanten Tiefdrucksystemen aus dem Mittelmeer und den dazu gehörigen Niederschlägen verhält, bleibt vorläufig noch offen.

Für das regionale Klimamodell Cosmo-CLM konnte gezeigt werden, dass Häufigkeit und Variabilität von Vb-Zugbahnen gut wiedergeben werden können (Hofstätter und Chimani, 2011). Weder für die Vergangenheit noch für die Zukunft (2030 bis 2070), konnte dabei eine signifikante Änderung der Häufigkeit von Vb-Zugbahnen gefunden werden.

Tabelle 5.1 Schema der Wechselwirkung unterschiedlicher Prozesse und Fernwirkungsmechanismen welche direkt oder indirekt das Wetter und Klima im Alpenraum bestimmen. Abkürzungen: EA – Eastern Atlantic Pattern; ENSO – El Niño-Southern Oscillation; EP – Eastern Pacific Pattern; EU – Eastern European Pattern; NADW – North Atlantic Deep Water; NAO – North Atlantic Oscillation; NPO – North Pacific Oscillation; PNA – Pacific North American Pattern; QBO – Quasi-Biennal Oscillation; WA – West Atlantic Pattern; WP – West Pacific Pattern. Quelle: Wanner et al. (1997) übersetzt ins Deutsche

Table 5.1 Scheme of interactions between different processes and tele-conncetions affecting the weather and climate in the Alpine region either directly or indirectly. Abbreviations: EA – Eastern Atlantic Pattern; ENSO – El Niño-Southern Oscillation; EP – Eastern Pacific Pattern; EU – Eastern European Pattern; NADW – North Atlantic Deep Water; NAO – North Atlantic Oscillation; NPO – North Pacific Oscillation; PNA – Pacific North American Pattern; QBO – Quasi-Biennal Oscillation; WA – West Atlantic Pattern; WP – West Pacific Pattern. Source: Wanner et al. (1997) translated into Geman

	Wichtige groß-skalige Prozesse und Fernwirkungsmechanismen	Räumliche Skala
ENSO QBO	Globaler Masse- und Energieaustausch: Ozeandynamik; Atmosphärisches Wärme/Feuchte Budge; Globale Luftdruck- und Windfelder	Global
Madden-Julian-Oszillation	Dynamik der Hadley Zelle; Subtropischer Jetstream; Passatwinde; Subtropischer Hochdruckgürtel	Global bis hemisphärisch
NPO, PNA EP, WP	Ozeanische Zirkulation; Meeresoberflächentemperatur; Meereis; Atmosphärische Dynamik der mittleren Breiten	Global bis hemisphärisch
NAO, WA EA EU	NADW Bildung; Dynamik des Nordatlantiks; Atmosphärische Zirkulation über Europa/Nordatlantik	Hemisphärisch bis kontinental
	Synoptisch-klimatologische Konfiguration über West- und Mitteleuropa	Kontinental (Europa)
	Synoptisch-klimatologische Konfiguration: Wetter und Klima des Alpenraumes	Regional (Alpenraum)

5.4.5 Veränderung großräumiger Zirkulationsmuster („Wetterlagen") im Klimawandel in Mitteleuropa und ihre Bedeutung für Österreich

Unter einer Wetterlage wird der großräumige Zustand der Atmosphäre über einem bestimmten Gebiet verstanden. Zur Charakterisierung dieses Zustandes werden z. B. räumliche Muster des Luftdruckes, des Geopotentials oder der Temperatur verwendet. Eine detaillierte Beschreibung und ein Vergleich aktueller Klassifikationsmethoden ist in Philipp et al. (2010) zu finden. Diese wurden im Rahmen der COST Initiative 733 („Harmonisation and Applications of Weather Type Classifications for European Regions"[1], entwickelt, untersucht und für verschiedenen Anwendungen getestet. Kennt man die typischen Wettererscheinungen bei Vorherrschen einer bestimmten Wetterlage aus langjährigen Messungen, so kann aus dem jeweiligen Wetterlagentypus auf die regionale Witterung in einem Gebiet geschlossen werden. Die Prozesskette der atmosphärischen Zirkulation welche das regionale Wetter und Klima im Alpenraum bestimmt, wurde aus Wanner et al. (1997) entnommen und ist in Tabelle 5.1 dargestellt.

Eine langfristige Veränderung des globalen Klima kann zu Änderungen in der Häufigkeit, der Andauer oder auch in der Ausprägungsform von Wetterlagen führen Die Summe solcher Veränderungen führt – in Kombination mit überlagerten, natürlichen Variationen des Klimas – zu einer Modifikation der regionalen Witterung bzw. des Wetters über die jeweiligen Wetterlagen.

Ein Teil des über Europa beobachteten Temperaturanstieges (1850 bis 2003) lässt sich durch eine langfristige Veränderun der Häufigkeit bestimmter Wetterlagen erklären (Philipp et al., 2007). Ob die Veränderung der täglichen Zirkulationsmuster rein zufälliger Natur ist oder durch die globale Erwärmung ausgelöst wird, ist noch nicht hinreichend geklärt. Im 20. Jahrhundert dominierten in Mitteleuropa bis in die späten 1920er Jahre hinein zonale (Ost-West gerichtete) Zirkulationsformen. Danach zeigt sich bis Mitte der 1970er eine Zunahme der Häufigkeit von meridionalen Zirkulationsformen (Wanner et al., 1997). Bis zum Ende des 20. Jahrhunderts wurde eine stetige Zunahme des Luftdrucks im Alpenraums beobachtet, die sich durch eine deutliche Zunahme in der Andauer von Hochdruckgebieten über West- und Südwesteuropa erklären lässt.

Im Zeitraum 1979 bis 2002 finden Fricke und Kaminski (2002) eine ausgeprägte Zunahme von Südwest-Wetterlagen bei einer gleichzeitigen Abnahme von Nordwestwetterlagen in Mitteleuropa. Des Weiteren hat die Häufigkeit von zyklonalen Westlagen – solche bei denen ein Tiefdruckgebiet vom Atlantik her ostwärts über Europa zieht – vor allem im Sommerhalbjahr der Jahre 1881 bis 1998 abgenommen.

In einer anderen Arbeit (KLIWA Arbeitskreis, 2006) wurden für Süddeutschland meridionale-, zonale- und gemischte

[1] http://www.cost.eu/domains_actions/essem/Actions/733

Zirkulationsformen hinsichtlich Langzeittrends untersucht. Im Winterhalbjahr nehmen dabei von 1950 bis 2000 zonale Zirkulationsformen deutlich ab, meridionale hingegen zu. Die Ergebnisse für das Sommerhalbjahr zeigen keine signifikanten Trends.

Zusammenfassend nimmt in Mitteleuropa bis dato der Einfluss meridionaler (süd-nord gerichteter) Zirkulationsformen zu, während der Einfluss von Wetterlagen die vom Atlantik her kommen zurückgeht. Unterschiede zwischen den verschiedenen Untersuchungen entstehen vor allem durch unterschiedliche Untersuchungsgebiete und unterschiedliche Methoden der Wetterlagenklassifikation.

Veränderungen der großräumigen Zirkulation in der Klimazukunft werden mit Hilfe von globalen Klimamodellen (GCMs) untersucht, doch konnten etwa in der Untersuchung von van Ulden und van Oldenborgh (2006), von 23 untersuchten GCMs lediglich acht Modelle die beobachtete Zirkulation und ihre Variabilität über Europa gut wiedergeben. Zu einem sehr ähnlichen Ergebnis kommen auch Casado und Pastor (2011). Die Modelle lassen jedenfalls eine Zunahme der Häufigkeit von Hochdruckgebieten über dem Westen und Südwesten Europas erwarten (siehe Abbildung 4.2 in Band 1, Kapitel 4). Das sommerliche Azorenhoch erstreckt sich demnach weiter nach Nordosten bis über Europa (z. B. Belleflamme, 2011).

5.5 Die Entwicklung weiter denken: Überraschungen, abrupte Änderungen und Kipp-Punkte im Klimasystem
5.5 Thinking ahead: surprises, abrupt changes and tipping points in the climate system

Allen bisherigen Überlegungen zum künftigen Klimawandel ist gemein, dass sie sich auf globale Klimamodelle und daraus abgeleitete Regionalisierungen stützen. Dabei darf nicht übersehen werden, dass Modelle Unsicherheiten unterschiedlicher Art unterliegen (vgl. Band 1, Kapitel 4), und keineswegs als getreues Abbild der Realität verstanden werden dürfen. Überraschungen sind daher durchaus möglich, ja sogar wahrscheinlich.

Unerwartete Wettersituationen und neue, überraschende Forschungsergebnisse helfen oft, bekannte und nicht erkannte Wissenslücken zu schließen. So wurden etwa in den 1980er Jahren in Europa Maßnahmen gegen die Versauerung der skandinavischen Seen und gegen das Waldsterben gesetzt. Dabei ging es vorwiegend um die Reduktion der Schwefeldioxidemissionen und der dadurch verursachten atmosphärischen Sulfatbildung. Das Sulfat war als wesentliche Quelle der Versauerung der Seen und der Schädigung der Bäume erkannt worden. In den 1980er und 1990er Jahren wurde für Europa ein besonders starker Temperaturanstieg beobachtet, der deutlich über dem globalen Mittel lag (siehe Band 1, Kapitel 3). Dass Sulfataerosole die atmosphärischen Strahlungsflüsse beeinflussen war zwar bekannt, dass sie aufgrund der Erhöhung des atmosphärischen Sulfatgehaltes merkbar klimawirksam geworden waren, war jedoch ein überraschendes Ergebnis späterer Forschung (siehe z. B. Wild et al., 2005). Ergebnisse aus Strahlungsmessungen aber auch Modellexperimente zeigten deutlich zunächst den Effekt des sogenannten „Global Dimmings“ und dann des „Global Brigthenings“. Die Reduktion der Sulfataerosolkonzentration wurde daher als zusätzlicher Antrieb (neben dem anthropogenen Treibhauseffekt) für den besonders starken Temperaturanstieg über Mitteleuropa seit ca. 1980 erkannt (Wild et al., 2005).

Eine aktuelle überraschende Entwicklung war die Aufstellung der Hypothese, dass die Auswirkungen des Klimawandels in der Arktis direkten Einfluss auf die Andauer, den Schneereichtum und das Temperaturniveau der Winter in Europa haben könnten (z. B. Petoukhov and Semenov, 2010, Jaiser et al., 2012). Reduzierte Meereisausdehnung im Sommer führt zu einem verstärkten Wärmeeintrag in die Atmosphäre und setzt die vertikale Stabilität der Atmosphäre herab. Dies könnte zu einer verstärkten Erzeugung atmosphärischen Wellen (planetare oder Rossby Wellen genannt) im Winter und damit einhergehend zu häufigeren Kaltluftvorstößen nach Europa führen (Jaiser et al., 2012). Eine andere Hypothese geht von vermehrtem Feuchtetransport in die Atmosphäre durch das fehlende Eis aus und von intensiviertem Blocking im Bereich der Arktis und dadurch verstärkten Kaltluftvorstößen Richtung Süden (Liu et al., 2012). Der Zusammenhang zwischen arktischer Meereisausdehnung und Winterniederschlag in Europa und Nordamerika ist jedenfalls nicht linear, so dass aus einem weiteren Rückgang des Meereises nicht direkt auf noch kältere und schneereichere Winter geschlossen werden kann.

Der Rückgang des Meereises in der Arktis ist auch ein Beispiel für eine sogenannte abrupte Änderung im Klimasystem: Die Eisbedeckung am Ende des Sommers ging einigermaßen linear mit dem Temperaturanstieg zurück, bis es im Jahr 2007 zu einer abrupten Abnahme kam, die weit über der von den Modellen erwarteten lag, obwohl die Modelle bis dahin gute Ergebnisse geliefert hatten (Stroeve et al., 2007). Der Rückgang der Eisbedeckung ist konsistent mit der Eis-Albedo-Rückkoppelung, die zur Erwärmung des Meeres und damit zum Schmelzen des Eises von unten beiträgt (Perovich et al., 2008).

Das Schmelzen des Eises trägt wiederum zur Erwärmung der unteren Atmosphäre bei (Screen und Simmonds, 2012). Die daraus folgende Zunahme von Regen auf Kosten von Schneefall reduziert die Albedo des Eises (Screen und Simmonds, 2012). Auch Zirkulationsänderungen in den Ozeanen und in der Atmosphäre, sowie Änderungen in der Bewölkung trugen zu der Abnahme der Eisausdehnung bei (Lenton, 2012).

Derartige abrupte Änderungen können auch in anderen Elementen des Klimasystems vorkommen. Während manche Prozesse im Klimasystem eher linearen Charakter aufweisen, sind andere in hohem Maße nicht-linear, sodass Auswirkungen einer Änderung über- oder unterproportional gegenüber der Änderung ausfallen können. Änderungen werden als abrupt definiert, wenn eine großräumige Änderung im Klimasystem sich innerhalb einiger Dekaden oder weniger einstellt, und mindestens über einige Dekaden anhält und wesentliche Störungen in natürlichen oder menschengemachten Systemen auslöst (IPCC, 2013). Derartige Störungen sind an sich schwer zu erfassen und ihr Eintreten schwer vorhersagbar, doch ist bekannt, dass verschiedene Komponenten oder Phänomene des Klimasystems potentiell abrupten Änderungen unterliegen könnten und in der Vergangenheit unterlegen sind (Dakos et al., 2008; Scheffer et al., 2009). Beispiele wären neben dem bereits erwähnten Arktischen Meereis, das Grönland Eisschild, die Atlantic Meridional Overturning Circulation, der Amazonas Regenwald und Monsunzirkulationen. Obwohl für einige dieser Systeme bereits Analysen hinsichtlich möglicher Konsequenzen durchgeführt wurden, bleiben die Ergebnisse unsicher und unter WissenschafterInnen umstritten (IPCC, 2013).

Eng verknüpft mit dieser Thematik ist die Frage der Irreversibilität der Änderungen, d. h. ob die Änderungen in einem Zeitraum rückgängig gemacht werden können, der vergleichbar mit dem Zeitraum der Entwicklung der Änderung ist (IPCC, 2013). Wegen der langen Lebensdauer des CO_2 in der Atmosphäre muss in diesem Kontext der Klimawandel an sich als irreversibel bezeichnet werden (Solomon et al., 2009).

Von besonderer Bedeutung für die Dringlichkeit von Klimaschutzmaßnahmen ist die Frage der sogenannten Kipp-Punkte, die mit Irreversibilität einhergehen können. Durch positive Rückkoppelungen im Klimasystem können angestoßene Veränderungen sich verstärken. Die Eis-Albedo-Rückkoppelung und die Treibhausgasrückkoppelung wurden bereits erwähnt (vgl. Band 1, Kapitel 1). Sie können dazu führen, dass eine Entwicklung zur Erwärmung oder zur Abkühlung, sobald einmal losgetreten, sich von selber, ohne dass der Auslöser weiterhin aktiv sein muss, fortsetzt, ja unter Umständen sogar beschleunigt. Wenn dies im Klimasystem eintritt, spricht man von der Überschreitung von Kipp-Punkten (Lenton et al., 2008; Hansen et al., 2008; Hansen 2009).

Im IPCC, 2013 wird angemerkt, dass nur wenige, auf vereinfachenden Modellen beruhende Studien Belege für globale Kipp-Punkte finden (z. B. Lenton et al., 2008), während Studien mit umfassenderen Klimamodellen innerhalb des 21. Jahrhunderts keine Hinweise auf Kipp-Punkte liefern. Die Ozeanzirkulation und Eisschilde könnten im Maßstab von einigen Jahrhunderten bis zu Jahrtausenden solche aufweisen, regional eventuell auch die Arktis (Lenton, 2012; Wadhams, 2012), obwohl die Befunde hier auseinandergehen (Armour et al., 2011; Tietsche et al., 2011). Ein weiteres System, das Kipp-Elemente (Tipping Elements TE nach Lenton et al., 2008) enthalten könnten, sind das El Niño/Southern Oscillation (ENSO-) System, dessen Kipp-Punkte zu erforschen die gegenwärtigen Klimamodelle nicht in der Lage sind (Latif und Keenlyside, 2009).

Es sind dies typische Beispiele für unsymmetrische, schiefe Verteilungen mit einem „dicken Ende“ (fat tail): Trägt man den verursachten Schaden gegen die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Ereignisses auf, dann kann der Schaden etwas kleiner oder etwas größer sein als beim wahrscheinlichsten Ereignis, er kann auch viel ärger sein, aber nicht viel geringer (National Research Council, 2013). Im Sinne der Umweltethik sind in einer derartigen Situation auch die viel schlimmeren Konsequenzen zu diskutieren (siehe Abschnitt 5.2). In den letzten Jahren ist es gelungen, für einige der Extreme ein gewisses Maß an Entwarnung zu geben: so gilt es jetzt als viel unwahrscheinlicher, dass es zu einer Verlagerung des Abtauchens der Thermohalinen Zirkulation in den mittleren Atlantik und damit zu einer plötzlichen, signifikanten Abkühlung in Europa kommt (National Research Council, 2013). Auch die unkontrollierte Freisetzung größerer Mengen von Methan aus den Ozeanen gilt inzwischen als wenig wahrscheinlich (National Research Council, 2013). In den meisten Fällen kann jedoch die Frage nach Kipp-Punkten weder eindeutig verneint, noch eindeutig bejaht werden (Schellnhuber, 2009). Großskalige Störungen (disruptive changes) im globalen System sind in der Regel nicht in Modellexperimenten enthalten und selten in Wirkungsanalysen. Mit Annäherung und Überschreiten der 2 °C Grenze wird das Überschreiten von Kipp-Punkten und damit das Auftreten abrupter Änderungen wahrscheinlicher (PIK, 2012).

Die National Academy of Science der USA widmete den Kipp-Punkten 2013 einen eigenen Bericht, in dem u. a. vorgeschlagen wird, ein Monitoring System einzurichten, um frühe Anzeichen von abrupten Änderungen und Kipp-Punkten zu erkennen (National Research Council, 2013). In dieser Studie

werden nicht nur Kipp-Punkte im Klimasystem untersucht, sondern auch „Wirkungs-Kipp-Punkte", d.h. solche in den vom Klimawandel betroffenen natürlichen Systemen. Schellnhuber (2009) wies schon darauf hin, dass auch ökonomische, soziale und politische Systeme Kipp-Punkte aufweisen könnten, die als Folge des Klimawandels überschritten werden könnten.

Untersuchungen über die potentiellen Auswirkungen abrupter Änderungen oder des Überschreitens von Kipp-Punkten im globalen oder regionalen Maßstab auf das Klima in Österreich liegen nicht vor. Für Österreich könnten aber derartige Vorgänge in kleinerem Maßstab von Bedeutung sein: etwa hinsichtlich des Rückzuges von Gletschern oder der Stabilität von Gebirgshängen. Auch hier sind entsprechende Studien noch ausständig.

5.6 Forschungsbedarf
5.6 Research needs

Der aktuelle Forschungsstand zum Klimawandel in Österreich wurde in den Kapiteln 2 bis 4 eingehend dargestellt. Es wurde auch aufgezeigt, welchen konkreten Forschungsfragen nachzugehen ist, um das Verständnis über den Klimawandel zu verbessern und um gezielt Maßnahmen zur Anpassung oder Emissionsminderung setzen zu können. Hier wird dieser Forschungsbedarf nochmals im Gesamtkontext zusammengefasst.

Die Voraussetzung für das Verständnis des Klimawandels und des Einflusses des Menschen auf das Klima ist einerseits die fortlaufende, langfristige Messung wesentlicher Klimakenngrößen sowie deren Analyse. Andererseits ist es notwendig die atmosphärischen Vorgänge und deren Wechselwirkungen, auch mit den anderen Erdsphären, modellhaft abzubilden.

Klimabeobachtungen haben in Österreich eine lange Tradition, während die Beobachtungsreihen für THG und Aerosole wesentlich jünger und weniger zahlreich sind. Folglich fehlen wichtige Informationen für die Ermittlung der natürlichen THG-Emissionen in Österreich. Systematische, kontinuierliche Aerosolbeobachtungen stehen erst am Anfang. Dies gilt nicht nur für Österreich, sondern auch auf internationaler Ebene. Dementsprechend ist auch das Wissen über THG, deren Verhalten in der Atmosphäre und ihr Einfluss auf den Strahlungshaushalt weiter fortgeschritten, während die vielfältigen, und räumlich variableren Prozesse der Aerosolbildung und -wirkung wesentlich weniger gut bekannt sind.

Mit dem Hohen Sonnblick hat Österreich eine hervorragende Hintergrundstation für atmosphärenchemische Messungen. Neben den sehr wertvollen, mehr als 125 Jahre umfassenden, Zeitreihen der meteorologischen Standardgrößen existieren mittlerweile zum Beispiel auch lange, praktisch unterbrechungslose Zeitreihen von stratosphärischem Ozon und UV-Strahlung am Sonnblick. Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf die Stratosphäre und die Erholung der Ozonschicht werden heute nur teilweise verstanden, weitere Forschungsarbeiten sind erforderlich, um bessere Aussagen über die zukünftige Entwicklung der Ozonschicht, die auch Einfluss auf die globale Strahlungsbilanz und damit das Klima ausübt, treffen zu können. Die Erweiterung der Strahlungsmessungen, die Teil des Baseline Surface Radiation Networks (BSRN) sind, durch Messungen der spektralen Albedo wäre ein wichtiger Schritt zum besseren Verständnis von Rückkoppelungsprozessen der Strahlungsbilanz und eine wichtige Schnittstelle zu Satellitenanwendungen. Neben dem Sonnblick wären jedoch auch zusätzliche Hintergrundmessstellen in Österreich für eine bessere räumliche Erfassung der atmosphärischen Prozesse wichtig.

Methoden der inversen Modellierung können Emissionsdaten validieren und so Verbesserungen für Inventuren ermöglichen. Österreich hat zur Entwicklung dieser relativ jungen Modellierverfahren beigetragen, doch könnten diese durch vermehrte Forschung noch wesentlich verbessert werden.

Zum Verständnis aktueller und künftiger Klimaprozesse kann die Kenntnis vergangener Entwicklungen Wesentliches beitragen. Ein zentrales Anliegen der Paläoklimatologie ist die Ausweitung der Proxyinformationen auf weitere Klimaelemente und auf andere Jahreszeiten (derzeit liegen vorwiegend Sommerinformationen vor). Mit verbesserten Chronologien und mehr Informationen über vergangene Extremereignisse, vor allem im Holozän, könnte die natürliche Variabilität auf sehr kurzen Zeitskalen quantitativ besser eingeschätzt werden. Auch die Untersuchung der „abrupten Klimaänderungen" im Pleistozän verspricht das Prozessverständnis von Klimaänderungen auf regionaler und lokaler Ebene zu verbessern. Hohes Potential zur zeitlichen und räumlichen Verdichtung der Klimainformation in Österreich bieten zahlreiche, noch nicht ausgewertete historische Dokumente – ein international weit verbreiteter und ergiebiger Forschungsansatz.

Das an sich gute meteorologische Datenmaterial erfordert hinsichtlich Datenqualität und Datendichte weitere Verbesserungen. Fortsetzung und Ausweitung der Digitalisierung und Homogenisierung instrumenteller Zeitreihen im Hinblick auf zusätzliche Klimaparameter und Ausbau in täglicher bzw. subtäglicher Auflösung sind zwingende Voraussetzung für ein besseres Verständnis der Veränderungen von Extremwerten. Geeignete Methoden zur räumlichen Interpolation der Da-

ten in komplexer Topographie sind zu entwickeln, auch unter Verwendung jüngerer Datensätze wie etwa Radar- oder Blitzortungsdaten und indirekt nutzbarer Daten aus Klimafolgen. Hier ist interdisziplinäre Kooperation notwendig. Durch eine internationale Kooperation zur Erstellung eines langjährigen und räumlich hochauflösenden Reanalysedatensatzes für den Alpenraum könnte eine einzigartige Grundlage für die Modellverbesserung von regionalen Klimamodellen und für die Modellierung von Klimafolgen erstellt werden.

Das kürzlich in Österreich initiierte hochqualitative Strahlungsmonitoring (ARAD Messnetz) würde durch eine Ausweitung auf die gesamte Energiebilanz wesentlich gewinnen. Insbesondere der latente Wärmefluss bzw. die damit zusammenhängende Verdunstung sind noch viel zu wenig bekannte Größen der Energie- bzw. Wasserbilanz, die daher auch in meteorologischen und hydrologischen Modellen nicht gut genug abgebildet werden können.

Für viele für den Menschen relevante Wetterereignisse, wie etwa Hochwasser oder Lawinen, ist es vorteilhaft meteorologische Abläufe über einige Tage zu erfassen, da sich meteorologische Ereignisse oft in ähnlicher Weise entwickeln und wiederholen. Die synoptische Klimatologie verfolgt einen dafür geeigneten Ansatz auf der Skala der Wetterphänomene (z. B. Hoch-, Tiefdruckgebiete, Fronten) bei gleichzeitiger Berücksichtigung von kleinräumigen meteorologischen Phänomenen. Die Klassifizierung der atmosphärischen Zirkulation in dominante Muster und Typen ermöglicht es die zugrunde liegenden Prozesse genauer zu berücksichtigen. Dadurch können dann schärfere Aussagen u. a. für Extremwert- und Variabilitätsanalysen, auch unter zukünftigen Klimazuständen, abgeleitet werden. Hier liegen erst wenige Arbeiten für Österreich vor.

Basis für alle Simulationen des zukünftigen Klimas sind globale Klimamodelle. Österreichische ForscherInnen greifen auf die international verfügbaren Modellergebnisse zurück, da globale Klimamodelle in Österreich nicht gerechnet werden. Ein wichtiger Schritt vor Nutzung der Ergebnisse ist die Validierung der Modelle für Österreich, insbesondere im alpinen Raum. Fehler, die in den Globalen Klimamodellen enthalten sind, lassen sich durch regionale Modelle nicht beheben. Die Entwicklung von Validierungsverfahren, die den globalen Modellen, den verfügbaren Daten und der geplanten weiteren Nutzung angemessen sind, ist eine meist unbedankte, aber wichtige Forschungsaufgabe. Eine Zusammenarbeit zwischen den EntwicklerInnen und NutzerInnen von Regionalmodellen und den EntwicklerInnen von Globalmodellen wäre wichtig, damit die Probleme im Alpenraum bzw. in Gebirgen vermehrt auch bei der Entwicklung von Globalmodellen wahrgenommen werden.

Derzeit stellen empirisch-statistische Verfahren eine wichtige Schnittstelle zwischen den Ergebnissen der Klimamodelle und den Eingangsdaten für die Simulation von Klimafolgen dar. Statistische Regionalisierung, Fehlerkorrektur oder die Abschätzung von Unsicherheiten sind wichtige Ziele der empirisch-statistischen Verfahren. Diese Methoden sind teilweise noch sehr rudimentär und haben deutliches Verbesserungspotential. Stärkere Förderung in diesem Bereich könnte die Qualität von Studien zur den Auswirkungen des Klimawandels, durch hohe Effektivität der Methoden, in den kommenden Jahren deutlich verbessern. Empirisch-statistische Verfahren können jedoch physikalische Modelle nicht ersetzen sondern nur ergänzen.

Es muss daher langfristiges Ziel sein, die Qualität der dynamischen Klimamodelle zu verbessern, damit im Idealfall eine Fehlerkorrektur mittels empirisch-statistischer Verfahren obsolet wird. Nur in den dynamischen Modellen werden Prozesse und Rückkopplungseffekte direkt erfasst und können daher auch in die Zukunft projiziert werden. Bei der in Österreich sehr regen regionalen Klimamodellierung geht es speziell um eine bessere Abbildung jener Prozesse, die im Alpenraum relevant sind. Neben einer weiteren Verfeinerung der räumlichen Auflösung muss auch an der Integration weiterer Prozesse gearbeitet werden. Wesentliche Ansatzpunkte sind: Modellparametrisierungen (z. B. Konvektion, Wolkenbildung, Schneeschmelze, Mikrophysik, Planetare Grenzschicht oder Turbulenz), Erhaltungsgrößen und physikalische Konsistenz; numerische Probleme im steilen Gelände; Probleme bei der Erhöhung der räumlich-zeitlichen Auflösung.

Ein offenkundiges Defizit der regionalen Modellierung ist die Bereitstellung jener Informationen, die in Klimafolgenuntersuchungen gebraucht werden. Systematische Untersuchung des Bedarfes und Abstimmung desselben mit ermittelbaren Kenngrößen könnte wesentliche Fortschritte bei der Folgenuntersuchung bewirken. Auch die Genauigkeitsanforderungen der Folgenforschung wären zu präzisieren, um auch weniger gut abgesicherte meteorologische Größen, wie Niederschlag, Feuchte, Wind, etc. besser nutzen zu können.

Das Verständnis für die Bedeutung der Schnittstelle zwischen meteorologisch-klimatologischen Fragestellungen und Fragen der Auswirkungen des Klimawandels auf natürliche und anthropogene Systeme muss gestärkt werden, um die Kompatibilität zwischen klimatologischen Ergebnissen und den Erfordernissen an Eingangsdaten für die Folgenforschung zu gewährleisten. Methodische Fortschritte zur Verbesserung dieser Schnittstellen sind erforderlich. Dabei geht es um Verbesserungen beim Implementieren von Sub-Modellen und Modellkopplungen und zwar nicht so sehr um die rein nu-

merische Ankoppelung, sondern um sinnvolle Verknüpfungen auf Basis des Verständnisses der Leistungsfähigkeit und der Erfordernisse der zu koppelnden Modelle. Beispiele sind die Koppelung regionaler Klimamodelle mit hydrologischen Modellen oder dynamischen Vegetationsmodellen oder das Einbauen biogeochemischer Zyklen. Von besonderer Bedeutung ist die vertiefte Analyse der Unsicherheiten und deren Auswirkungen auf die Folgenforschung.

Viele kleinräumige Phänomene werden derzeit weder messtechnisch noch durch regionale Klimamodelle zufriedenstellend erfasst. Es ist kein Zufall, dass sich zu kleinräumigen Extremereignissen, wie Gewitter, Hagel, Tornados oder Starkniederschlägen auch im vorliegenden Band des AAR14 wenig Information findet. Klimafolgenuntersuchungen, insbesondere ökonomische Analysen, erfordern jedoch vor allem Angaben über Häufigkeit und Intensität extremer wetterbedingter Ereignisse. Methodische Weiterentwicklungen und alternative Ansätze sind nötig, um Aussagen über klimabedingte Veränderungen kleinräumiger Prozesse und deren Auswirkungen machen zu können.

Angesichts der Tatsache dass ein wesentlicher Teil der österreichischen Bevölkerung in Städten lebt, stellt die Untersuchung der zu erwartenden Klimaveränderungen von städtischen Gebieten eine wesentliche Herausforderung der Zukunft dar. Für die Bundeshauptstadt Wien besteht sowohl hinsichtlich Datenerhebung als auch Modellierung ein Wissensdefizit. Ein Vergleich auf internationaler Ebene zeigt, dass andere Städte wesentlich besser untersucht sind. Die Forschung zur Entwicklung der Stadt Wien im Klimawandel läuft erst jetzt an und muss noch deutlich verstärkt werden, insbesondere im Blickpunkt des für die nächsten Jahre prognostizierten Zuzugs nach Wien und der fortschreitenden Urbanisierung des Umlandes. Besonderes Augenmerk sollte in Österreich auch Städten mit 20- bis 50 000 EinwohnerInnen geschenkt werden. Städte dieser Größe weisen schon städtisches Mikroklima auf, sehen sich aber finanziell in der Regel nicht in der Lage, Messnetze zu betreiben oder Klimastudien durchführen zu lassen.

Schließlich fehlen für Österreich Analysen über Auswirkungen globaler abrupter Änderungen oder Kipp-Punkte. Die Analyse der Auswirkungen des Verlustes von arktischem Polareis für Österreich läuft derzeit erst zaghaft an. Diese Art der Forschung zeigt deutlich, dass sich Österreich an globalen Forschungsaufgaben wie etwa der Polarforschung nicht nur aus Gründen der globalen Verantwortung sondern auch aus Gründen der nationalen Auswirkungen beteiligen muss. Zu möglichen Auswirkungen globaler abrupter Änderungen auf Österreich und zu lokalen abrupten Änderungen liegen noch keine Studien vor.

Abschließend sei noch angemerkt, dass auch Forschung zur Kommunikation des Klimawandels, insbesondere ethischer, psychologischer und soziologischer Aspekte für die KlimaforscherInnen Österreichs von Bedeutung wäre.

5.7 Aussagen zum Klimawandel und deren Belastbarkeit
5.7 Statements on climate change and their resilience

Im folgenden Abschnitt wird eine Auswahl der in den Kapiteln 1 bis 4 dargestellten Befunde zum Klimawandel global (Tabelle 5.2) und in Österreich (Tabelle 5.3) dargestellt. Damit soll nochmals in Kurzform der Stand des Wissens zu einzelnen Themenbereichen des Klimawandels vor allem aber auch die entsprechende Unsicherheit aufgezeigt werden. Bei der Bewertung der Unsicherheit wird der Grad der Sicherheit (S, aus der Qualität und den Umfang der Datenbasis abgeschätzt) einerseits und der Grad der Übereinstimmung unter WissenschafterInnen (Ü) andererseits, im Sinne der Unsicherheitsskala des IPCC (2013) Berichtes angegeben.

Tabelle 5.2 Wichtige Aussagen zur Klimaänderung auf globaler Skala mit hoher Relevanz für den Alpenraum und in Österreich. S beschreibt Qualität und den Umfang der Datenbasis, Ü den Grad der Übereinstimmung unter WissenschafterInnen [H = hoch, M = mittel, N = niedrig]

Table 5.2 Important statements on the climate change at the global scale with high relevance for the Alpine region and Austria. S describes Quality and comprehensiveness of the data base, Ü the degree of agreement among scientists [H = high, M = medium, N = low]

	Aussage	S	Ü	AAR14 Kapitel
1	Das globale Temperaturmittel 2003 bis 2012 war um 0,78°C (mit 90 %iger Sicherheit zwischen 0,72–0,85°C) wärmer als das Mittel 1850 bis 1900 (IPCC, 2013). Den Temperaturanstieg zeigen meteorologische Messungen ebenso wie qualitative Beobachtungen der belebten Natur.	H	H	1/1
2	Änderungen des Klimas sind an sich nichts Ungewöhnliches: Der stete Wechsel von langen Glazialen und kurzen Interglazialen ist das prägende Bild des globalen Klimas im Quartär. Die präzise bekannten, langfristigen Schwankungen der Erdbahnelemente bewirken eine Änderung der Sonnenenergie welche über Rückkoppelungen Eiszeit-Warmzeit-Zyklen steuert (Milankovitch-Theorie).	H	H	1/1 und 1/3
3	Für die langfristige Zukunft ist prinzipiell mit weiteren Eiszeit-Warmzeit-Zyklen zu rechnen. Die Dauer des gegenwärtigen Interglazials, des Holozäns, ist jedoch unklar, da nach Modellrechnungen beim derzeitigen Niveau des CO_2-Gehalts der Atmosphäre (rund 390 ppm) keine neuerliche Vereisung eintreten wird.	H	H	1/1 und 1/3
4	Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Ozean sind eine wesentliche Ursache für Klimaschwankungen auf der Zeitskala von Jahren bis Jahrhunderten. Für das europäische Klima hoch relevant ist die atlantische meridionale Tiefenzirkulation (AMOC), von der ein wesentlicher Teil der Nordatlantikstrom („Golfstrom") ist. Damit gekoppelt ist die nordatlantische Oszillation (NAO), die mit Klimaschwankungen in Europa vor allem im Winterhalbjahr in Verbindung steht.	H	M	1/1
5	Eine Erhöhung der natürlichen THG-Konzentrationen in der Atmosphäre führt zu einer Verstärkung des Treibhauseffektes und damit zur Erwärmung, da die derzeit herrschenden THG-Konzentrationen nur einen sehr kleinen Teil der Ausstrahlung der Erde absorbieren. „Sättigung" ist noch für kein THG erreicht.	H	M	1/1
6	Wasserdampf ist jenes Gas, das die stärkste direkte Treibhauswirkung besitzt. Seine Konzentration steigt u.a. infolge erhöhter Verdunstung von den Ozeanen mit der globalen Erwärmung.[1]	H	H	1/1
7	Der Anstieg der Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre ist auf anthropogene Quellen (vorwiegend Verbrennung fossiler Brennstoffe) zurückzuführen; er wird gedämpft durch erhöhte Kohlenstoffaufnahme der Ozeane und der Biosphäre.	H	H	1/1 und 1/2
8	Die in den letzten Jahrzehnten beobachteten Temperaturänderungen sind nach heutigem Verständnis des Klimasystems nur zu erklären, wenn der Einfluss der anthropogenen THG-Emissionen berücksichtigt wird.	H	H	1/1
9	Der Beitrag von Intensitätsänderungen der Sonnenstrahlung zur beobachteten Erwärmung liegt bei ca. einem Zwanzigstel jenes der THGe (ohne Wasserdampf). Jedoch ist das wissenschaftliche Verständnis über die Wirkung von THG viel besser als das über die Änderungen der Solarstrahlung.	H	H	1/1
10	Die relativ geringe Erwärmung im letzten Jahrzehnt ist wahrscheinlich zu einem Großteil auf Klimavariabilität zurückzuführen, insbesondere auf eine episodische Speicherung großer Energiemengen in den Ozeanen.	M	M	1/1
11	Kleine Ursachen können im komplexen, nichtlinearen Klimasystem große Wirkungen haben, wenn Gleichgewichte gestört und Rückkoppelungsmechanismen ausgelöst werden. Der Mensch kann deshalb merkbar in das Klimasystem eingreifen.	H	H	1/1
12	Szenarienberechnungen für die Zukunft ergeben – je nach Entwicklung von Bevölkerungszahlen, Wirtschaft, Technologie, etc. ohne Berücksichtigung der Unsicherheiten – eine globale Temperaturerhöhung zwischen 2 °C (RCP2.6) und 3,5 °C (RCP8.5) bis 2100 gegenüber heute.[2]	M	M	1/1
13	Zusammen mit Verschiebungen in den mittleren Bedingungen verändern sich auch Häufigkeit und Intensität extremer Ereignisse.	M	H	1/1
14	Bereits beobachtete Zunahmen der Häufigkeiten oder Intensitäten extremer Wetterereignisse können, müssen aber nicht, mit dem Klimawandel zusammenhängen.	H	H	1/1
15	Das international akkordierte politische Ziel von maximal 2 °C Erwärmung gegenüber dem vorindustriellen Temperaturniveau wird nur im ehrgeizigsten Konzentrationspfad (RC2.6 nach IPCC, 2013) erreicht. Größere Unterschiede zwischen einzelnen Szenarien treten erst Mitte des 21. Jahrhunderts auf.	N	M	1/1
16	Aus Modellsimulationen ist abzuleiten, dass in Nord- und Zentraleuropa Niederschlagsextreme eher an Intensität und Häufigkeit zunehmen, für den Mittelmeerraum ist dagegen eine Änderung von Extremniederschlägen ungewiss.	M	M	1/4

[1] Änderungen in der Wasserdampfkonzentration werden den Auswirkungen des Klimawandels zugerechnet, nicht den anthropogenen THG-Emissionen. Wasserdampf ist jenes Gas, das die stärkste direkte Treibhauswirkung entfaltet. Aufgrund seiner kurzen atmosphärischen Lebenszeit ist seine Konzentration primär von der Temperatur bestimmt, die die Verdunstung aus Ozeanen beeinflusst; es wirkt somit vor allem als Verstärker der Effekte anderer, langlebiger THGe.

[2] Diese Berechnungen setzen im sozio-ökonomischen Bereich Kontinuität voraus. Brüche sind nicht berücksichtigt.Wichtige Aussagen zur Klimaänderung im Alpenraum und in Österreich basierend auf den Ergebnissen von AAR14. S beschreibt Qualität und den Umfang der Datenbasis, Ü den Grad der Übereinstimmung unter WissenschafterInnen [H = hoch, M = mittel, N = niedrig]

Tabelle 5.3 Wichtige Aussagen zur Klimaänderung im Alpenraum und in Österreich basierend auf den Ergebnissen von AAR14. S beschreibt Qualität und den Umfang der Datenbasis, Ü den Grad der Übereinstimmung unter WissenschafterInnen [H = hoch, M = mittel, N = niedrig]

Table 5.3 Important statements on the climate change for the Alpine region and Austria based on AAR14. S describes Quality and comprehensiveness of the data base, Ü the degree of agreement among scientists [H = high, M = medium, N = low]

	Aussage	S	Ü	AAR14 Kapitel
1	Gegen Ende des letzten Glazials (Würm) erfolgte vor etwa 30 000 Jahren der jüngste eiszeitliche Gletschervorstoß bis über den Alpenrand hinaus. Verlässliche Paläoklimadaten dieser Zeit für die Alpen fehlen bislang; man geht jedoch von einer Absenkung der Jahresmitteltemperatur von mindestens 10 °C im Vergleich zum Holozän aus, verbunden mit einer ausgeprägten Abnahme des Niederschlags gegen Osten hin.	N	M	1/3
2	Die letzten 2000 Jahre zeigten eine Abfolge von warmen und kalten Perioden, die im Schnitt kühler waren als zu Beginn und in der Mitte des Holozäns. Den deutlichen, instrumentell belegten Temperaturanstieg des 20. Jahrhunderts spiegeln die natürlichen Klima-Archive ebenfalls wider, auch wenn viele Proxy-Datensätze um das Jahr 2000 enden und daher die aktuelle Klimaentwicklung nicht gänzlich erfassen.	M	H	1/3
3	Die Auflösung und Datierung relativ junger Proxy-Zeitreihen ist für den Alpenraum so gut, dass man direkte Vergleiche mit verschiedenen klimasteuernden Parametern anstellen kann: So mit der Sonnenaktivität, deren Minima sich in fast allen Archiven als kältere Perioden widerspiegeln; mit Vulkanausbrüchen, die in Abhängigkeit von emittiertem Staub und Gasen zu starken Abkühlungen führten; oder mit THGen, die eine wichtige Rolle für die deutliche Erwärmung seit den 1980er Jahren spielen. Daraus ergibt sich ein Bild verschiedener steuernder Kräfte, die sich überlagern.	H	H	1/3
4	Ein Großteil der nationalen Emissionen (etwa 79 % der Gesamtemissionen) erfolgt durch die energetische Nutzung von fossiler Energie, als größtem Subsektor ist dem Straßenverkehr mehr als ein Drittel davon zuzuordnen. Die Zunahme des Holzvorrats im Wald wirkt als Senke im Ausmaß von etwa 5 % der Emissionen, ist aber von Jahr zu Jahr variabel und ist in den letzten Jahren deutlich vermindert. Die Emissionen von Lachgas (vor allem aufgrund des Einsatzes von Stickstoffdünger im Ackerbau) und Methan (in erster Linie aufgrund von Viehzucht) entsprechen 6 % bzw. 7 % der Gesamtemissionen.	H	H	1/2
5	Entwicklung der in der THG-Inventur erfassten Emissionen zeigt, dass es sektoral kaum zu Veränderungen zwischen 1990 und 2010 kam. Die für das Gesamtergebnis (Zunahme der Emissionen um 19 %) wesentlichen Ausnahmen sind der Verkehr sowie das weitgehende Wegfallen der Senkenfunktion der Wälder durch Sättigungseffekte der betroffenen Ökosysteme, begleitet von verbesserten forstlichen Möglichkeiten und erhöhtem Einsatz von Biomasse als Energieträger.	H	H	1/2
6	Signifikante Effekte werden auch durch Substanzen bewirkt, die nur eine kurze Aufenthaltsdauer in der Atmosphäre (wenige Tage) haben. Sie spielen eine wichtige Rolle im Klimasystem – vor allem Aerosole können der Erwärmung teilweise entgegenwirken (im Ausmaß etwa der Hälfte des anthropogenen Treibhauseffektes)	N	M	1/2
7	Die Temperaturzunahme an hochalpinen Stationen in Österreich ist der in der freien Atmosphäre mit Radiosonden in Wien gemessenen sehr ähnlich. In der Stratosphäre (50 hPa) ist eine deutliche Temperaturabnahme zu beobachten. Der am Boden im Vergleich mit dem globalen Mittel stärkere Erwärmungstrend im Alpenraum gleicht sich in höheren Schichten den in mittleren Breiten sonst gefundenen Erwärmungsraten an.	M	M	1/3
8	Die besonders starke negative dekadische Temperaturanomalie von 1870 bis 1900 und die besonders starke positive der aktuellen drei Jahrzehnte führten, verglichen mit dem globalen Mittel, zu einer doppelt so starken Temperaturanomalie in Österreich und im gesamten Alpengroßraum.	H	H	1/3
9	Saisonale Klimaentwicklungen verlaufen nicht notwendigerweise analog zu jener der Jahresmittel. Im Herbst war die Erwärmung im Alpenraum am geringsten. Phasenweise gab es sogar gegenläufige Entwicklungen, wie etwa die besonders milden Winter der 1910er Jahre, die durch besonders kühle Sommer konterkariert wurden. Es war dies eine eher ozeanisch dominierte Phase, die auch besonders feucht und durch vorstoßende Gletscher-geprägt war.	H	H	1/3
10	Die Sonnenscheindauer hat in den letzten 130 Jahren um ca. 20 % zugenommen, im Sommerhalbjahr stärker als im Winterhalbjahr. Einem ersten ausgeprägten Maximum um 1950 folgten sonnenscheinärmere Jahrzehnte bis etwa 1980 („global dimming") und eine seither anhaltende „regional brightening" Phase, die die sommerliche Sonnenscheindauer in nur drei Jahrzehnten erneut um beinahe 20 % ansteigen ließ.	M	M	1/3 und 1/2
11	Beobachtungen des Luftdrucks in Europa belegen für das südliche Mitteleuropa eine nordwärts Verlagerung des subtropischen Hochdruckgürtels. Das kann als weiterer Antrieb für die beobachtete deutliche Zunahme der Sonnenscheindauer herangezogen werden.	M	M	1/3
12	Während die Lufttemperatur während der instrumentellen Messperiode eine sehr einheitliche zeitliche Entwicklung im Alpenraum zeigt, ist die Niederschlagsentwicklung im Großraum Alpen regional sehr unterschiedlich ausgefallen.	H	H	1/3

	Aussage	S	Ü	AAR14 Kapitel
13	Die Jahressummen des Niederschlags sind in Österreich seit Mitte der 1970er Jahre überall gestiegen, außer im Südosten, wobei die Zunahme im Norden und inneralpin gleichmäßig ansteigend war (mehr als 15 % im Norden, ca. 10 % inneralpin), während der Westen und Südosten stark durch dekadische Minima und Maxima geprägt war.	H	H	1/3
14	Die Winterniederschläge sind in Österreich nördlich des Alpenhauptkammes seit Mitte der 1970er Jahre etwas gestiegen, südlich des Alpenhauptkammes hingegen deutlich gefallen. In den anderen Jahreszeiten gab es tendenziell eine Zunahme des Niederschlags in ganz Österreich mit Ausnahme des Südens wo die Trends sehr gering waren.	H	H	1/3
15	Direkte Messungen der Windgeschwindigkeit können derzeit noch nicht für eine statistisch abgesicherte Analyse von Änderungen der Sturmhäufigkeiten oder -intensitäten herangezogen werden. Aus Luftdruckdaten abgeleitete Zeitreihen der Winterstürme zeigen seit den 1870er Jahren starke interannuelle Variabilität, jedoch keine signifikanten Trends.	H	H	1/3
16	Änderungen von Extremwertindizes auf der Basis homogenisierter Zeitreihen täglicher Niederschlagssummen sind in der anthropogenen Periode meist nicht signifikant.	M	M	1/3
17	Änderungen von Extremwertindizes der täglichen Maximum- und Minimumtemperaturen zeigen in der anthropogenen Periode analoge Trends zum Temperaturmittel, also eine Zunahme der heißen Extremwerte und eine Abnahme der kalten. Diese Trends sind österreichweit ähnlich und meist signifikant.	H	H	1/3
18	Nach Modellberechnungen ist zu erwarten, dass die mittlere Temperatur in Österreich im 21. Jahrhundert weiter ansteigen wird, wobei in den nächsten Jahrzehnten mit etwa +0,25 °C pro Jahrzehnt zu rechnen ist. In der 2. Hälfte des 21. Jahrhunderts ist der Temperaturanstieg stark von zukünftigen anthropogenen Emissionen abhängig. Unter Annahme des A1B Szenarios beschleunigt sich der Temperaturanstieg auf etwa +0,36 °C pro Jahrzehnt, sodass bis zum Ende des Jahrhunderts mit insgesamt 3,5 °C Erwärmung zu rechnen ist (Vergleichszeitraum 1961 bis 1990).	H	H	1/4
19	Die Niederschlagsänderung im 21. Jahrhundert wird wahrscheinlich eine Zunahme im Winter und eine Abnahme im Sommer aufweisen. Dabei wird mit einer erhöhter Niederschlagszunahme nördlich der Alpen im Frühling, Sommer und Herbst gerechnet, während die südlichen und westlichen Teile des Alpenraumes verstärkte Abnahmen aufweisen. Die Unsicherheiten bezüglich der projizierten Niederschlagszu- und abnahmen sind bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts sehr groß, nehmen aber bis zum Ende des Jahrhunderts wieder ab.	M	M	1/4
20	Die Häufigkeit im Auftreten von Hitzewellen wird bis zum Ende des Jahrhunderts deutlich ansteigen.	H	M	1/4
21	Untersuchungen an Daten der Vergangenheit und konzeptionelle Überlegungen lassen erwarten, dass es auf Grund der zukünftigen Temperaturerhöhung (und dem damit verbundenen erhöhten Feuchtegehalt der Atmosphäre) zu intensiveren Niederschlagsereignissen insbesondere im Sommer kommen wird.	N	N	1/4

5.8 Literaturverzeichnis
5.8 References

Allex, B., Liebl, U., Brandenburg, C., Gerersdorfer, T., Czachs, C., 2011. „Hot town, summer in the city" – Die Auswirkungen von Hitzetagen auf das Freizeit- und Erholungsverhalten sowie das Besichtigungsprogramm von StädtetouristInnen – dargestellt am Beispiel Wiens (Endbericht von Start-Clim2010.F in Start-Clim2010: Anpassung an den Klimawandel: Weitere Beiträge zur Erstellung einer Anpassungsstrategie für Österreich). Auftraggeber: BMLFUW, BMWF, BMWFJ, ÖBF, Wien.

Armour, K.C., Eisenman, I., Blanchard-Wrigglesworth, E., McCusker, K.E., Bitz, C.M., 2011. The reversibility of sea ice loss in a state-of-the-art climate model. Geophys. Res. Lett. 38, L16705. doi:10.1029/2011GL048739

Auer, I., Böhm, R., Mohnl, H., 1989. Klima von Wien: eine anwendungsorientierte Klimatographie, Beiträge zur Stadtforschung, Stadtentwicklung und Stadtgestaltung. Magistrat der Stadt Wien, Geschäftsgruppe Stadtentwicklung, Stadtplanung und Personal, Geschäftsgruppe Umwelt, Freizeit und Sport, Wien.

Auer, I., Böhm, R., Schöner, W., Hagen, M., 1998. 20th century increase of boundary layer turbidity derived from alpine sunshine and cloudiness series, in: Preprints of the 8th Conference on Mountain Meteorology. American Meteorological Society, Boston, Flagstaff, Arizona, pp. 77–80.

Auer, I., Böhm, R., Korus, E., Schöner, W., 2003. Zeitliche Repräsentativitätsanalyse 50jähriger Klimadatensätze im Hinblick auf die Beschreibung der Variabilität von Extremwerten.

Auer, I., Böhm, R., Jurkovic, A., Lipa, W., Orlik, A., Potzmann, R., Schöner, W., Ungersböck, M., Matulla, C., Briffa, K., Jones, P., Efthymiadis, D., Brunetti, M., Nanni, T., Maugeri, M., Mercalli, L., Mestre, O., Moisselin, J.-M., Begert, M., Müller-Westermeier, G., Kveton, V., Bochnicek, O., Stastny, P., Lapin, M., Szalai, S., Szentimrey, T., Cegnar, T., Dolinar, M., Gajic-Capka, M., Zaninovic, K., Majstorovic, Z., Nieplova, E., 2007. HISTALP—historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region. International Journal of Climatology 27, 17–46. doi:10.1002/joc.1377

Awan, N.K., Formayer, H., 2012. Development of new methods to assess heavy precipitation in the Alps. ACQWA (No. Annual Progress Report).

Bácsatyai, L., Csaplovics, E., Márkus, I., Sinhuber, A.B., 1997. Digitale Geländemodelle des Neusiedler See-Beckens. Burgenländ. Landesmuseum (Amt d. Bgld. Landesregierung, Abt. XII/1-LM).

Belleflamme, A., Fettweis, X., Erpicum, M., 2011. Evaluation of the present and future general circulation over Greenland simulated by the IPCC AR5/CMIP5 GCMs with the help of a circulation type classification. EGU2011-1206, European Geosciences Union General Assembly 2011.

Böhm, R., 1979. Stadtentwicklung und Trend der Wärmeinselintensität. Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie B 27, 31–46.

Böhm, R., 1998. Urban bias in temperature time series – a case study for the city of Vienna, Austria. Climatic Change 38, 113–128.

Böhm, R., Auer, I., Schöner, W., Hagen, M., 1998. Long alpine barometric time series in different altitudes as a measure for 19th/20th century warming, in: Preprints of the 8th Conference on Mountain Meteorology. American Meteorological Society, Boston, Flagstaff, Arizona, pp. 72–76.

Böhm, R., Auer, I., Schöner, W., 2011. Labor über den Wolken: die Geschichte des Sonnblick-Observatoriums. Böhlau Verlag.

Brundtland, G.H., 1987. Report of the World Commission on environment and development: Our Common Future. United Nations.

Casado, M.J., Pastor, M.A., 2011. How well do IPCC AR4 models simulate circulation types? EGU2011-1206, European Geosciences Union General Assembly 2011.

Craven, G., 2009. What's the Worst That Could Happen?: A Rational Response to the Climate Change Debate, Original edition. ed. Perigee Trade, New York.

Crichton, M., 2004. State of fear: a novel, 1st ed. ed. HarperCollinsPublishers, New York.

Dakos, V., Scheffer, M., Nes, E.H. van, Brovkin, V., Petoukhov, V., Held, H., 2008. Slowing down as an early warning signal for abrupt climate change. PNAS 105, 14308–14312. doi:10.1073/pnas.0802430105

Daly, H.E., 1990. Sustainable Growth – an Impossible Theorem. Development, Journal of the Society for International Development 45–47.

Damerau, K., 2008. Climate change and energy security-a losing deal? Impacts, Trade-offs and Adaptation Possibilities for Metropolitan Areas. A Scenario Approach for Long-range Energy Planning in the Greater Vienna Region (Diplomarbeit). Universität Wien. Fakultät für Geowissenschaften, Geographie und Astronomie, Wien.

Dobesch, H., Neuwirth, F., 1974. Übersicht über die Ergebnisse aus den hydrometeorologischen Untersuchungen im Gebiet des Neusiedler Sees im Rahmen der Internationalen Hydrologischen Dekade 1966–1974, in: Skoda, F., Lauscher, F. (Eds.), Wetter und Leben, Zeitschrift Für Angewandte Meteorologie. Verlag der Österreichischen Gesellschaft für Meteorologie.

Dobesch, H., Neuwirth, F., 1982. Die Beiträge der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik zum Internationalen Hydrologischen Programm 1975-1980, in: Skoda, F., Lauscher (Eds.), Zeitschrift Für Angewandte Meteorologie. Verlag der Österreichischen Gesellschaft für Meteorologie.

Dubois, C., Somot, S., Calmanti, S., Carillo, A., Déqué, M., Dell'Aquilla, A., Elizalde, A., Gualdi, S., Jacob, D., L'Hévéder, B., Li, L., Oddo, P., Sannino, G., Scoccimarro, E., Sevault, F., 2012. Future projections of the surface heat and water budgets of the Mediterranean Sea in an ensemble of coupled atmosphere–ocean regional climate models. Climate Dynamics 39, 1859–1884. doi:10.1007/s00382-011-1261-4

Eitzinger, J., Kubu, G., Formayer, H., Haas, P., Gerersdorfer, T., Kromp-Kolb, H., 2009. Auswirkungen einer Klimaänderung auf den Wasserhaushalt des Neusiedlersees (Endbericht im Auftrag der Burgenländischen Landesregierung vom 15. Juli 2005) (Boku-Met Report No. 1). Institut für Meteorologie (BOKU-Met) Department Wasser – Atmosphäre – Umwelt Universität für Bodenkultur, Wien.

Emmerich, R., 2004. The Day After Tomorrow.

FAO, 1996. Agro-ecological zoning: Guidelines (No. 73), FAO Soils Bulletin. Soil Resources, Management and Conservation Service. FAO Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

Feynman, R.P., 1955. The value of science. Engineering and Science 19, 13–15.

Fischer, E.M., Schär, C., 2010. Consistent geographical patterns of changes in high-impact European heatwaves. Nature Geoscience 3, 398–403. doi:10.1038/ngeo866

Formayer, H., Haas, P., Hofstätter, M., Radanovics, S., Kromp-Kolb, H., 2007. Räumlich und zeitlich hochaufgelöste Temperaturszenarien für Wien und ausgewählte Analysen bezüglich Adaptionsstrategien (Endbericht einer Studie im Auftrag der Wiener Umweltschutzabteilung - MA 22 der Stadt Wien gemeinsam mit der MA 27 - EU-Strategie und Wirtschaftsentwicklung.). Institut für Meteorologie, Universität für Bodenkultur, Wien.

Formayer, H., Matulla, C., Haas, P., Groll, N., 2009. Möglichkeiten statistischer Downscalingverfahren zur Ableitung von Extremereignissen in Österreich aus GCM-Feldern (Endbericht StartClim.5, November 2003) (BOKU-Met Report No. 3).

Fricke, W., Kaminski, U., 2002. Ist die Zunahme von Starkniederschlägen auf veränderte Wetterlagen zurückzuführen?, GAW Brief des Deutschen Wetterdienstes Nr 12.

Früh, B., Becker, P., Deutschländer, T., Hessel, J.-D., Kossmann, M., Mieskes, I., Namyslo, J., Roos, M., Sievers, U., Steigerwald, T., Turau, H., Wienert, U., 2011a. Estimation of Climate-Change Impacts on the Urban Heat Load Using an Urban Climate Model and Regional Climate Projections. Journal of Applied Meteorology and Climatology 50, 167–184. doi:10.1175/2010JAMC2377.1

Früh, B., Roos, M., Koßmann, M., 2011b. Frankfurt am Main im Klimawandel - eine Untersuchung zur städtischen Wärmebelastung, Berichte des Deutschen Wetterdienstes. Selbstverl. des Dt. Wetterdienstes, Offenbach am Main.

GEA, 2012. Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.

Godina, R., Lalk, P., Lorenz, P., Müller, G., Weilguni, V., 2006. Hochwasser 2005 - Ereignisdokumentation Teilbericht des Hydrographischen Dienstes. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft Sektion Wasser.

Grazzini, F., Van der Grijn, G., 2002. Central European floods during summer 2002. ECMWF newsletter 96, 18–28.

Habersack, H., Moser, A., 2003. Ereignisdokumentation Hochwasser August 2002, Plattform Hochwasser (No. 1). ZENAR, Universität für Bodenkultur, Bundesministerium für Land und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.

Habersack, H., Krapesch, G., 2006. Hochwasser 2005-Ereignisdokumentation der Bundeswasserbauverwaltung, des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach-und Lawinenverbauung und des Hydro-

graphischen Dienstes (Synthesebericht). Bundesministerium für Land-und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.

Hansen, J., Sato, M., Kharecha, P., Beerling, D., Berner, R., Masson-Delmotte, V., Pagani, M., Raymo, M., Royer, D.L., Zachos, J.C., 2008. Target atmospheric CO2: Where should humanity aim? The Open Atmospheric Science Journal 2, 217–231. doi:10.2174/1874282300802010217

Hansen, J., 2009. Storms of My Grandchildren: The Truth About the Coming Climate Catastrophe and Our Last Chance to Save Humanity. Bloomsbury London - Berlin - New York.

Harlfinger, O., Knees, G., 1999. Klimahandbuch der österreichischen Bodenschätzung. Wagner.

Hofstätter, M., Böhm, R., 2011. Machbarkeitsstudie. Vb-artige Wetterlagen als Ursache exzessiver Niederschläge im Alpenraum (Machbarkeitsstudie im Auftrag des Bundesministerium für Land und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Sektion VII –Wasser). ZAMG, Wien.

Hofstätter, M., Chimani, B., 2011. WETPAT. Vb-artige Wetterlagen im Klimawandel aus regionalen Klimamodellsimulationen mit Cosmo-CLM (Projektbericht). ZAMG, Wien.

Hofstätter, M., Chimani, B., 2012. Van Bebber's cyclone tracks at 700 hPa in the Eastern Alps for 1961–2002 and their comparison to Circulation Type Classifications. Meteorologische Zeitschrift 21, 459–473. doi:10.1127/0941-2948/2012/0473

Horx, M., 2007. Warum ich nicht an die Klimakatastrophe glaube [WWW Document]. Welt Online. URL http://www.welt.de/politik/article759237/Warum-ich-nicht-an-die-Klimakatastrophe-glaube.html (accessed 8.31.13).

Hulme, M., 2009. Why we disagree about climate change: understanding controversy, inaction and opportunity. Cambridge University Press, Cambridge, UK; New York.

IPCC, 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Jacob, D., Göttel, H., Kotlarski, S., Lorenz, P., Sieck, K., 2008. Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland - Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland (Forschungsbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes No. 11), Climate Change. Umweltbundesamt, Deutschland, Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M), Hamburg.

Jaiser, R., Dethloff, K., Handorf, D., Rinke, A., Cohen, J., 2012. Impact of sea ice cover changes on the Northern Hemisphere atmospheric winter circulation. Tellus A 64, 11595. doi:10.3402/tellusa.v64i0.11595

James, P., Stohl, A., Spichtinger, N., Eckhardt, S., Forster, C., 2004. Climatological aspects of the extreme European rainfall of August 2002 and a trajectory method for estimating the associated evaporative source regions. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 4, 733–746. doi:10.5194/nhess-4-733-2004

Jonas, H., 1979. Das Prinzip Verantwortung: Versuch einer Ethik für die technologische Zivilisation, 1. Auflage. ed. Insel-Verlag, Frankfurt am Main.

KLIWA Arbeitskreis, 2006. Langzeitverhalten der Starkniederschläge in Baden-Württemberg und Bayern, KLIWA-Projekt A 1.1.3 (No. 8), KLIWA-Berichte. LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz, Baden-Württemberg.

Koboltschnig, G.R., Schöner, W., Holzmann, H., Zappa, M., 2009. Glaciermelt of a small basin contributing to runoff under the extreme climate conditions in the summer of 2003. Hydrological Processes 23, 1010–1018. doi:10.1002/hyp.7203

Kromp-Kolb, H., Formayer, H., Clementschitsch, L., 2007. Auswirkungen des Klimawandels auf Wien unter besonderer Berücksichtigung von Klimaszenarien (Im Auftrag der Magistratsdirektion der Stadt Wien – Klimaschutzkoordination). Institut für Meteorologie Universität für Bodenkultur.

Kubu, G., 2006. Ökodynamishe Rehabilitierung des Neusiedler See. Dotation Neusiedler See unter Berücksichtigung von Klimaänderungen. (Im Auftrag des Amtes der Burgenländischen Landesregierung Landeswasserbaubezirksamt Schützen am Gebirge).

Kundzewicz, Z.W., Ulbrich, U., Brücher, T., Graczyk, D., Krüger, A., Leckebusch, G.C., Menzel, L., Pińskwar, I., Radziejewski, M., Szwed, M., 2005. Summer Floods in Central Europe – Climate Change Track? Natural Hazards 36, 165–189. doi:10.1007/s11069-004-4547-6

Kyselý, J., Kalvová, J., Květoň, V., 2000. Heat Waves in the South Moravian Region during the Period 1961-1995. Studia Geophysica et Geodaetica 44, 57–72. doi:10.1023/A:1022009924435

Latif, M., Keenlyside, N.S., 2009. El Niño/Southern Oscillation response to global warming. PNAS 106, 20578–20583. doi:10.1073/pnas.0710860105

Lautenschlager, M., Keuler, K., Wunram, C., Keup-Thiel, E., Schubert, M., Will, A., Rockel, B., Boehm, U., 2009. Climate Simulation with CLM, Scenario A1B run no.2, Data Stream 3: European region MPI-M/MaD. WDCC at DKRZ. doi:10.1594/WDCC/CLM_A1B_2_D3

Lautenschlager, M., Keuler, K., Wunram, C., Keup-Thiel, E., Schubert, M., Will, A., Rockel, B., Boehm, U., 2011. Climate Simulation with CLM, Climate of the 20th Century run no.3, Data Stream 3: European region MPI-M/MaD. WDCC at DKRZ. doi:10.1594/WDCC/CLM_C20_3_D3

Lenton, T.M., 2012. Arctic Climate Tipping Points. AMBIO 41, 10–22. doi:10.1007/s13280-011-0221-x

Lenton, T.M., Held, H., Kriegler, E., Hall, J.W., Lucht, W., Rahmstorf, S., Schellnhuber, H.J., 2008. Inaugural Article: Tipping elements in the Earth's climate system. Proceedings of the National Academy of Sciences 105, 1786–1793. doi:10.1073/pnas.0705414105

Leuschner, A., 2012. Die Glaubwürdigkeit der Wissenschaft: eine wissenschafts- und erkenntnistheoretische Analyse am Beispiel der Klimaforschung, Science studies. Transcript, Bielefeld.

Liu, J., Curry, J.A., Wang, H., Song, M., Horton, R.M., 2012. Impact of declining Arctic sea ice on winter snowfall. PNAS. doi:10.1073/pnas.1114910109

Loibl, W., Tötzer, T., Köstl, M., Züger, H., Knoflacher, M., 2011. Modelling Micro-climate Characteristics for Urban Planning and Building Design, in: Hřebíček, J., Schimak, G., Denzer, R. (Eds.), Presented at the 9th IFIP WG 5.11 International Symposium on Environmental Software Systems: Frameworks of eEnvironment, ISESS 2011; Brno; Czech Republic; 27 June 2011 through 29 June 2011, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 605–617. doi:10.1007/978-3-642-22285-6_65

Malitz, G., Schmidt, T., 1997. Hydrometeorologische Aspekte des Sommerhochwassers der Oder 1997, in: Deutscher Wetterdienst (Ed.), Klimastatusbericht 1997. Offenbach, Frankfurt, pp. 28–36.

Meinharter, E., Balas, M., 2011. Anpassungsempfehlungen für urbane Grün- und Freiräume in österreichischen Städten und Stadtregionen (Endbericht von StartClim2010. B in StartClim2010: Anpassung an den Klimawandel: Weitere Beiträge zur Erstellung

einer Anpassungsstrategie für Österreich). Auftraggeber: BMLFUW, BMWF, BMWFJ, ÖBF.

Mesinger, F., Strickler, R.F., 1982. Effect of mountains on Genoa cyclogenesis. Journal of the Meteorological Society of Japan -Ser. II 60, 326–338.

Moshammer, H., Hutter, H.P., Frank, A., Gerersdorfer, T., Hlava, A., Sprinzl, G., Leitner, B., 2006. Einflüsse der Temperatur auf Mortalität und Morbidität in Wien (StartClim2005.A1a Teilprojekt von StartClim2005 – Klimawandel und Gesundheit!). Universität für Bodenkultur, Department für Wasser – Atmosphäre – Umwelt Institut für Meteorologie, Wien.

Moshammer, H., Hutter, H.P., Gerersdorfer, T., 2009. Einfluss von Adaptationsmaßnahmen auf das akute Sterberisiko in Wien durch Temperaturextreme (StartClim2008.A Teilprojekt von StartClim2008). Institut für Umwelthygiene Medizinische Universität Wien, ZPH, Universität für Bodenkultur,Institut für Meteorologie, Wien, Austria.

Mudelsee, M., Börngen, M., Tetzlaff, G., Grünewald, U., 2004. Extreme floods in central Europe over the past 500 years: Role of cyclone pathway „Zugstrasse Vb". Journal of Geophysical Research 109. doi:10.1029/2004JD005034

Mursch-Radlgruber, E., Trimmel, H., Gerersdorfer, T., 2009. Räumliche Differenzierung der mikroklimatischen Eigenschaften von Wiener Stadtstrukturen und Anpassungsmaßnahmen. Ergebnisse kleinklimatischer Messungen. Teil 2 der Studie „Räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Temperaturszenarien für Wien und ausgewählte Analysen bezüglich Adaptationsstrategien". Wiener Umweltschutzabteilung (MA 22), EU-Strategie und Wirtschaftsentwicklung (MA 27).

Muthers, S., Matzarakis, A., Koch, E., 2010. Climate change and mortality in Vienna—A human biometeorological analysis based on regional climate modeling. International Journal of Environmental Research and Public Health 7, 2965–2977. doi:10.3390/ijerph7072965

Nakicenovic, N., 2003. Global energy perspectives and the role of technology. Elektrotech. Inftech. 120, 377–381. doi:10.1007/BF03054921

National Research Council, 2013. Abrupt Impacts of Climate Change: Anticipating Surprises. The National Academies Press, Washington, DC.

Oke, T.R., 1982. The energetic basis of the urban heat island. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 108, 1–24. doi:10.1002/qj.49710845502

Oke, T.R., 1987. Boundary Layer Climates. Routledge.

ÖNORM, 1983. Vereinfachte Berechnung des zeitbezogenen Wärmeverlustes (Heizlast) von Gebäuden.

Oreskes, N., Conway, E.M.M., 2010. Merchants of doubt: how a handful of scientists obscured the truth on issues from tobacco smoke to global warming, 1st U.S. ed. ed. Bloomsbury Press, New York.

ÖSTA, n.d. Erste Landesaufnahme. 1773-1781. Kriegs-Charte des Erzherzogtums Oesterreich unter der Enns, 1:28.800 (Wien). Kolorierte Handzeichnung, 122 Sectionen à 71,5 x 47 cm, Sectionen 59,60,61,70,71,72,81,82,83: Theil deren Vierteln unter Wiener Wald, und unter Manhartsberg, Österreichisches Staatsarchiv/Kriegsarchiv: B IX a 242

Perovich, D.K., Richter-Menge, J.A., Jones, K.F., Light, B., 2008. Sunlight, water, and ice: Extreme Arctic sea ice melt during the summer of 2007. Geophys. Res. Lett. 35, L11501. doi:10.1029/2008GL034007

Petoukhov, V., Semenov, V.A., 2010. A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents. J. Geophys. Res. 115, D21111. doi:10.1029/2009JD013568

Philipp, A., Bartholy, J., Beck, C., Erpicum, M., Esteban, P., Fettweis, X., Huth, R., James, P., Jourdain, S., Kreienkamp, F., Krennert, T., Lykoudis, S., Michalides, S.C., Pianko-Kluczynska, K., Post, P., Álvarez, D.R., Schiemann, R., Spekat, A., Tymvios, F.S., 2010. Cost733cat – A database of weather and circulation type classifications. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, Classifications of Atmospheric Circulation Patterns – Theory and Applications 35, 360–373. doi:10.1016/j.pce.2009.12.010

Philipp, A., Della-Marta, P.M., Jacobeit, J., Fereday, D.R., Jones, P.D., Moberg, A., Wanner, H., 2007. Long-Term Variability of Daily North Atlantic–European Pressure Patterns since 1850 Classified by Simulated Annealing Clustering. J. Climate 20, 4065–4095. doi:10.1175/JCLI4175.1

Pichler, H., Steinacker, R., 1987. On the synoptics and dynamics of orographically induced cyclones in the Mediterranean. Meteorology and Atmospheric Physics 36, 108–117. doi:10.1007/BF01045144

PIK, 2012. Turn down the heat: Why a 4° warmer world must be avoided (A Report for the World Bank by the Potsdam Institute for Climate Impact Research and Climate Analytics), World Bank Publications. International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank.

Piribauer, S., Strasser, S., 2010. „Hot in the city" – Klimadatenreihenanalyse in Hinblick auf die Vulnerabilität des Wiener Städtetourismus. Bakkalaureatsarbeit zur Erlangung des akademischen Grades eines(r) Bakkalaureus/Bakkalaurea der Technischen Wissenschaften der Studienrichtung Kulturtechnik und Wasserwirtschaft an der Universität für Bodenkultur,Wien.

Planet under Pressure, 2012. State of the planet declaration. New knowledge towards solutions. London. http://www.planetunderpressure2012.net/pdf/state_of_planet_declaration.pdf.

Popper, K., 1955. Logik der Forschung, [Springer, Wien 1935], 11. Aufl. 2005. Ed. Mohr Siebeck, Tübingen.

Prettenthaler, F., Gobiet, A. (Eds.), 2008. Heizen und Kühlen im Klimawandel. Erste Ergebnisse zu den künftigen Änderungen des Energiebedarfs für die Gebäudetemperierung Studien zum Klimawandel in Österreich. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien.

Pröbstl, U., Jiricka, A., Schauppenlehner, T., 2007. See-Vision: Einfluss von klimawandelbedingten Wasserschwankungen im Neusiedler See auf die Wahrnehmung und das Verhalten von Besucherinnen und Besuchern (Endbericht StartClim2006.D3 Teilprojekt von StartClim2006). Finanziert aus Mitteln des BMLFUW, des BMGFJ, des BMWF, des BMWA und der Österreichischen Hagelversicherung, Wien.

Řezáčová, D., Kašpar, M., Müller, M., Sokol, Z., Kakos, V., Hanslian, D., Pešice, P., 2005. A comparison of the flood precipitation episode in August 2002 with historic extreme precipitation events on the Czech territory. Atmospheric Research 77, 354–366. doi:10.1016/j.atmosres.2004.10.008

Ruckstuhl, C., Philipona, R., Behrens, K., Collaud Coen, M., Dürr, B., Heimo, A., Mätzler, C., Nyeki, S., Ohmura, A., Vuilleumier, L., Weller, M., Wehrli, C., Zelenka, A., 2008. Aerosol and cloud effects on solar brightening and the recent rapid warming. Geophys. Res. Lett. 35, L12708. doi:10.1029/2008GL034228

Rudari, R., Entekhabi, D., Roth, G., 2004. Terrain and Multiple-Scale Interactions as Factors in Generating Extreme Preci-

pitation Events. Journal of Hydrometeorology 5, 390–404. doi:10.1175/1525-7541(2004)005<0390:TAMIAF>2.0.CO;2
Rudolf, B., Rapp, J., 2003. Das Jahrhunderthochwasser der Elbe: Synoptische Wetterentwicklung und klimatologische Aspekte, in: Deutscher Wetterdienst (Ed.), Klimastatusbericht 2002. Offenbach, pp. 172–187.
Sailor, D.J., 2001. Relating residential and commercial sector electricity loads to climate-evaluating state level sensitivities and vulnerabilities. Energy 26, 645–657. doi:10.1016/S0360-5442(01)00023-8
Schär, C., Vidale, P.L., Lüthi, D., Frei, C., Häberli, C., Liniger, M.A., Appenzeller, C., 2004. The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. Nature 427, 332–336. doi:10.1038/nature02300
Scheffer, M., Bascompte, J., Brock, W.A., Brovkin, V., Carpenter, S.R., Dakos, V., Held, H., van Nes, E.H., Rietkerk, M., Sugihara, G., 2009. Early-warning signals for critical transitions. Nature 461, 53–59. doi:10.1038/nature08227
Schellnhuber, H.J., 2009. Tipping elements in the Earth System. Proceedings of the National Academy of Sciences 106, 20561–20563. doi:10.1073/pnas.0911106106
Schicker, I., Radanovics, S., Seibert, P., 2010. Origin and transport of mediterranean moisture and air. Atmospheric Chemistry and Physics 10, 5089–5105. doi:10.5194/acp-10-5089-2010
Schöner, W., Böhm, R., 2007. A statistical mass-balance model for reconstruction of LIA ice mass for glaciers in the European Alps. Annals of Glaciology 46, 161–169. doi:10.3189/172756407782871639
Schöner, W., Böhm, R., Auer, I., 2012. 125 years of high-mountain research at Sonnblick-Observatory (Austrian Alps)—from „the house above the clouds" to a unique research platform. Theoretical and Applied Climatology 110, 491–498. doi:10.1007/s00704-012-0689-8
Schönerklee, M., Kinner, P., Heiß, G., Soja, G., Kleissner, A., Schindler, J., Treitler, R., 2008. Cli-mate Change – Impacts on hydrology and regional development. Scientific Study on the Impacts of the Decreasing Water Level of Lake Neusiedl, Austria. Vortrag beim IWA World Water Congress, Wien - Kongresszentrum; 09.09.2008–13.09.2008.
Schörghuber, S., Rammer, W., Lexer, M.J., 2012. Analyse von Vulnerabilität und Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel im Biosphärenpark Wienerwald (Endbericht vonStartClim2009.C in StartClim2009: Anpassung an den Klimawandel: Beiträge zur Erstellung einer Anpassungsstrategie für Österreich, Auftraggeber: BMLFUW, BMWF, BMWFJ, ÖBF). Universität für Bodenkultur, Department für Wasser - Atmosphäre - Umwelt, Wien, Austria.
Screen, J.A., Simmonds, I., 2012. Declining summer snowfall in the Arctic: causes, impacts and feedbacks. Clim Dyn 38, 2243–2256. doi:10.1007/s00382-011-1105-2
Seibert, P., Frank, A., Formayer, H., 2007. Synoptic and regional patterns of heavy precipitation in Austria. Theor. Appl. Climatol. 87, 139–153. doi:10.1007/s00704-006-0198-8
Sevault, F., Somot, S., Beuvier, J., 2009. A regional version of the NEMO ocean engine on the Mediterranean Sea: NEMOMED8 user's guide. Note de travail du Groupe de Météorologie Grande Echelle et Climat.
Sievers, U., 1990. Dreidimensionale Simulation in Stadtgebieten. Schriftenreihe Umweltmeteorologie 15, 36–43.
Sievers, U., 1995. Verallgemeinerung der Stromfunktionsmethode auf drei Dimensionen. Meteorologische Zeitschrift 4, 3–15.
Soja, G., Züger, J., Knoflacher, M., Kinner, P., Soja, A.-M., 2013. Climate impacts on water balance of a shallow steppe lake in Eastern Austria (Lake Neusiedl). Journal of Hydrology 480, 115–124. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.12.013
Solomon, S., Plattner, G.-K., Knutti, R., Friedlingstein, P., 2009. Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions. PNAS pnas.0812721106. doi:10.1073/pnas.0812721106
Spämann, R., 1979. Technische Eingriffe in die Natur als Problem der politischen Ethik. Scheidewege 9/4, 476–497.
Statistik Austria, 2012. Demographisches Jahrbuch 2011. (Seite 60)
Steinnocher, K., 1996. Integration of spectral and spatial classification methods for building a land-use model of Austria, in: Kraus, K., Waldhäusl, P. (Eds.), XVIIIth ISPRS Congress Technical Commission IV: Mapping and Geographic Information Systems. Presented at the XVIIIth ISPRS Congress Technical Commission IV, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna, Austria, pp. 841–846.
Stroeve, J., Holland, M.M., Meier, W., Scambos, T., Serreze, M., 2007. Arctic sea ice decline: Faster than forecast. Geophys. Res. Lett. 34, L09501. doi:10.1029/2007GL029703
Thaler, S., Holawe, F., Mursch-Radlgruber, E., 2005. Fluctuations in heat related mortality in Vienna, in: Deutscher Wetterdienst (Offenbach, M. (Ed.), Annalen der Meteorologie Nr. 41, Band 1 und 2: 17th International Congress of Biometeorology ICB 2005. Presented at the 17th International Congress of Biometeorology ICB 2005, Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main.
Thaler, S., Holawe, F., Mursch-Radlgruber, E., 2008. Are there any influences of meteorological conditions on mortality fluctuations in Vienna, Austria, in: American Meteorological Society (Ed.), Presented at the 18th Conference on Atmospheric BioGeosciences / 28th Conference on Agricultural and Forest Meteorology, Orlando.
Tietsche, S., Notz, D., Jungclaus, J.H., Marotzke, J., 2011. Recovery mechanisms of Arctic summer sea ice. Geophys. Res. Lett. 38, L02707. doi:10.1029/2010GL045698
Ulbrich, U., Brücher, T., Fink, A.H., Leckebusch, G.C., Krüger, A., Pinto, J.G., 2003. The central European floods of August 2002: Part 2 –Synoptic causes and considerations with respect to climatic change. Weather 58, 434–442. doi:10.1256/wea.61.03B
UNCED, 1992. Rio - Erklärung über Umwelt und Entwicklung, in: Report of the United Nations Conference on Environment and Development, Rio de Janeiro.
UNFCCC, 1992. Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen.
Van Bebber, W.J., 1882. Typische Witterungserscheinungen. Archiv der Deutschen Seewarte Bd. V *1882*.
Van Bebber, W.J., 1891. Die Zugstrassen der barometrischen Minima nach den Bahnenkarten der Deutschen Seewarte für den Zeitraum 1875-1890. 361–366.
Van Bebber, W.J., Köppen, W., 1895. Die Isobarentypen des Nordatlantischen Ozeans und Westeuropas, ihre Beziehung zur Lage und Bewegung der Barometrischer Maxima und Minima. Archiv deutsch. Seewarte 18, 1–27.
Van Ulden, A.P., van Oldenborgh, G.J., 2006. Large-scale atmospheric circulation biases and changes in global climate model simulations and their importance for climate change in Central Europe. Atmospheric Chemistry and Physics 6, 863–881.
Wadhams, P., 2012. Arctic Ice Cover, Ice Thickness and Tipping Points. AMBIO 41, 23–33. doi:10.1007/s13280-011-0222-9
Wanner, H., Rickli, R., Salvisberg, E., Schmutz, C., Schüepp, M., 1997. Global climate change and variability and its influence on

Alpine climate – concepts and observations. Theor Appl Climatol 58, 221–243. doi:10.1007/BF00865022
Wild, M., Gilgen, H., Roesch, A., Atsumu, O., Long, C.N., Dutton, E.G., Forgan, B., Kallis, A., Russak, V., Tsvetkov, A., 2005. From Dimming to Brightening: Decadal Changes in Solar Radiation at Earth's Surface. Science 308, 847–850. doi:10.1126/science.1103215
ZAMG, 2012. Gewitterserie ab Mitte Juni 2012 in der Steiermark. ZAMG, Universität für Bodenkultur, Wien.
Zängl, G., 2004. Numerical simulations of the 12–13 August 2002 flooding event in eastern Germany. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 130, 1921–1940. doi:10.1256/qj.03.152
Žuvela -Aloise, M., 2011. SISSI: Simulationen von Städtischen Klimaszenarien (Projektbericht).
Žuvela -Aloise, M., Nemec, J., Früh, B., 2012. Dynamical modelling of urban climate of Vienna. Presented at the 8th International conference on Urban Climate and 10th Symposium on the Urban Environment (ICUC8), Dublin, Ireland.
Žuvela-Aloise, M. 2013. FOCUS-I: Adaption and mitigation of the climate change impact on urban heat stress based on model runs derived with an urban climate model, ACRP final report, pp. 67.
Žuvela-Aloise, M., Koch R., Neureiter, A., Böhm R. And S. Buchholz (2014). Reconstructing urban climate of Vienna based on historical maps dating to the early instrumental period, Urban Climate, DOI: 10.1016/j.uclim.2014.04.002

Band 2: Klimawandel in Österreich: Auswirkungen auf Umwelt und Gesellschaft

Volume 2: Climate Change in Austria: Environmental and Societal Implications

Band 2 Kapitel 1: Zur Kopplung zwischen Treiber- und Reaktionssystemen sowie zur Bewertung von Folgen des Klimawandels

Volume 2 Chapter 1: On Coupling of Driver and Response Systems and on Evaluating Consequences of Climate Change

Koordinierende Leitautoren
Johann Stötter, Herbert Formayer, Franz Prettenthaler

LeitautorInnen
Martin Coy, Matthias Monreal, Ulrike Tappeiner

Für den Begutachtungsprozess
Andrea Prutsch

Inhalt

ZUSAMMENFASSUNG

Im System Erde sind Mensch / Gesellschaft und Umwelt untrennbar miteinander verbunden – das System Erde ist deshalb als Mensch-Umwelt-System zu betrachten. Im Hinblick auf den Klimawandel spielt der Mensch sowohl die Rolle des Agierenden als auch des Reagierenden, wobei sich die Folgen des Globalen Klimawandels auf der regionalen / lokalen Ebene direkt und indirekt auf das Mensch-Umwelt-System auswirken. Zum einen ist die Gesellschaft direkt betroffen (z. B. Hitzestress), zum anderen laufen die Folgewirkungen indirekt über klimabedingte Veränderungen in den Natursystemen und deren Auswirkung auf die Gesellschaft ab.

Dem Verständnis der generellen Kopplung zwischen dem Menschen / der Gesellschaft und dem natürlichen System kommt deshalb zentrale Bedeutung zu. Von gleicher Wichtigkeit ist aber das Wissen über die Schnittstellen zwischen der Maßstabsebene des globalen Klimawandels als Treiber / Impulsgeber und den Reaktionen in lokaler oder regionaler Dimension. Hierbei ist zu bedenken, dass beim Klimawandel Ort und Zeit der Reaktion in der Regel nicht mit Ort und Zeit des Impulses übereinstimmen.

Die Kopplung zwischen Mensch und Umwelt bzw. Mensch und Natur wird anhand theoretischer Konzepte diskutiert. Hierbei werden die Überlegungen zur Risikoforschung, zur Humanökologie und zu verschiedenen Ansätzen der Sozialen Ökologie sowie das Konzept der „Sustainability Science“ dargestellt. Hinsichtlich der Kopplung zwischen Impuls des globalen Klimawandels und den Folgeerscheinungen auf regionaler oder lokaler Ebene werden die Vulnerabilität, Resilienz und Kapazität als Parameter diskutiert, die in unterschiedlicher Weise die Anpassung des reagierenden Systems beeinflussen bzw. steuern.

Im Band 2 werden die Auswirkungen des Klimawandels anhand eines Sphärenkonzepts gegliedert. Auf der Seite des natürlichen Subsystems werden die Hydrosphäre, Biosphäre, Reliefsphäre und Pedosphäre betrachtet, denen auf der gesellschaftlichen Seite die Anthroposphäre gegenüber steht. Hier werden explizit die Themenfelder Gesundheit, Soziales, Ökonomie, Tourismus, Naturgefahren, Siedlung und Infrastruktur behandelt. Die Folgen des Klimawandels auf die Natursphären werden analysiert, qualitativ und, soweit möglich, auch quantiativ dargestellt und im Hinblick auf ihre Bedeutung für die Gesellschaft bewertet. Hierzu findet das Konzept der Ökosystemdienstleistungen Anwendung. Dabei wird zwischen Versorgungsleistungen, Regulierungsleistungen, kulturellen Leistungen sowie Unterstützungs- und Basisleistungen differenziert.

SUMMARY

Human society and the natural environment are inextricably linked within the Earth System – it must therefore be conceived as the human-environment system. Humans take on a twofold role in the context of climate change: as an agent of change and as a subject of this change. The impacts of global climate change unfold directly on a local and regional level and indirectly affect the human-environment system as a whole. On the one hand, society is directly impacted (e. g. heat waves), while on the other hand climate induced changes in the natural environment impact society indirectly.

A thorough understanding of the coupling of human society and the natural system and its interlinkages and complex feedbacks is therefore pivotal. At the same time it is of equal importance to understand the interfaces where climate change as global driver has significant impacts at local and regional levels. It is crucial to keep in mind that the location and timing of climate impulses are often decoupled from location and timing of the precipitating impacts.

Various theoretical approaches to the linkage between human society and natural environmental systems have been put forward. Risk research, human ecology and approaches from social-ecology and sustainability science are discussed in some detail. The coupling of global climate change impulses and its effect at the regional and local level can be understood within the concepts of vulnerability, resilience and capacity. These attributes of the human-environment system lend themselves not only to describe, but also to take, influence and steer the reacting system in various ways.

In Volume 2 the impacts of climate change are captured on the basis of a concept of spheres. The natural sub-system is made up of hydrosphere, biosphere, reliefsphere and pedosphere. These are juxtaposed with the anthroposphere. Particular attention is given to the thematic fields: health, society, economy, tourism, natural hazards, settlement and infrastructure. The impacts of climate change on the natural spheres are qualitatively, where possible quantitatively, analysed with respect to their impact on society. Here the concept of ecosystem services finds application. Utility, regulating, cultural, supporting and basis services are differentiated.

KERNAUSSAGEN

- Im System Erde sind Mensch / Gesellschaft und Umwelt untrennbar miteinander verbunden, das System Erde ist deshalb als Mensch-Umwelt-System zu betrachten. Folglich muss eine sektorale Betrachtung von Folgen des Kli-

mawandels im Natursystem immer im Kontext der Gesellschaft erfolgen.

- Im Hinblick auf den Klimawandel spielt der Mensch sowohl die Rolle des Agierenden als auch des Reagierenden, wobei sich die Folgen des Globalen Klimawandels auf der regionalen / lokalen Ebene direkt und indirekt auf das Mensch-Umwelt-System auswirken. Zum einen wird die Gesellschaft direkt betroffen, zum anderen laufen die Folgewirkungen indirekt über klimabedingte Veränderungen in den Natursystemen und deren Auswirkung auf die Gesellschaft ab.
- Dem Verständnis der generellen Kopplung zwischen dem Menschen / der Gesellschaft und dem natürlichen System kommt deshalb zentrale Bedeutung zu. Von gleicher Wichtigkeit ist aber das Wissen über die Schnittstellen zwischen der Maßstabsebene des globalen Klimawandels als Treiber / Impulsgeber und den Reaktionen in lokaler oder regionaler Dimension.
- Hierbei ist zu bedenken, dass beim Klimawandel Ort und Zeit der Reaktion in der Regel nicht mit Ort und Zeit des Impulses übereinstimmen.
- Das Konzept der Ökosystemdienstleistungen ermöglicht es, die Folgen des Klimawandels auf die Natursphären im Hinblick auf ihre Bedeutung für die Gesellschaft zu bewerten. Dabei wird zwischen Versorgungsleistungen, Regulierungsleistungen, kulturellen Leistungen sowie Unterstützungs- und Basisleistungen differenziert.

Box 1.1: Glossar der Schlüsselbegriffe
Box 1.1: Glossary of key terms

Anpassung
Strategien und Maßnahmen, um die Empfindlichkeit natürlicher und gesellschaftlicher Systeme gegenüber tatsächlichen oder erwarteten Auswirkungen der Klimaänderung zu verringern. Es können verschiedene Arten von Anpassungen unterschieden werden: autonome / spontane vs. geplante, vorausschauende / proaktive vs. reaktive, private vs. öffentliche Anpassung.

Anpassungsfähigkeit
Gesamtheit der regional unterschiedlichen Fähigkeiten, Ressourcen und Institutionen von Individuen oder Gruppen, von einem Land oder einer Region, sich mit wirksamen Maßnahmen an den Klimawandel anpassen zu können. In der Anpassungsfähigkeit spielen Vulnerabilität, Resilienz und Kapazität zusammen.

Anthroposphäre
Im Sphärenkonzept für das System Erde steht die Anthroposphäre der Natursphäre / den Natursphären gegenüber. Die Anthroposphäre umfasst alle Prozesse menschlichen Lebens (z. B. Grunddaseinsfunktionen, wie Ernährung, Wohnen, Arbeiten, Kommunizieren) sowie dadurch geschaffenen Artefakte, wie etwa Siedlungen, Verkehrsinfrastruktur, Kulturlandschaften.

Anthropozän
Von Paul Crutzen und Eugene Stoermer in Diskussion gebrachte geochronologische Periode, in welcher der Mensch zum wichtigsten Einflussfaktor in natürlichen Prozesskreisläufen im System Erde geworden ist. Lokales und regionales Handeln des Menschen bewirken globale Folgen, z. B. den Klimawandel. Der Zeitraum fällt mit der Phase der Industrialisierung zusammen, die neben technologischen Entwicklungen vor allem auf der Inwertsetzung fossiler Energierohstoffe beruht.

Biosphäre
Natursphäre, die alle Formen tierischen und pflanzlichen Lebens und die damit verbundenen Lebensreaktionen umfasst.

Exposition

Die Exposition gibt an, wie weit das Mensch-Umwelt-System bestimmten Änderungen von Klimaparametern (z. B. Niederschlag, Temperatur etc.) ausgesetzt ist. Sie ist ein Maß für die regionale Ausprägung (Stärke, Geschwindigkeit, Zeitpunkt erwarteter Änderungen etc.) globaler Klimaänderungen.

Hydrosphäre

Natursphäre, die den Wasserkreislauf im System Erde umfasst. Wasser wird in seinen drei Zustandsphasen berücksichtigt: flüssig als Oberflächen- und unterirdisches Wasser, wie z. B. in Ozeanen, Meeren, Flüssen, Süßwasserseen, im Grundwasser; fest als Eis wie z. B. in Gletschern, auf Seen und Meeren sowie als Schnee und in Permafrostkörpern; sowie gasförmig in Form von Wasserdampf.

Kapazität

Die Fähigkeit eines Individuums oder einer Gruppe, eines Gesellschafts- oder Umweltsystems, sowohl negative als auch positive Impulse aufzunehmen und auch in Richtung eines verbesserten Systemzustands weiter zu entwickeln. Die Kapazität ist damit von zentraler Bedeutung für die Anpassungsfähigkeit.

Kryosphäre

Natursphäre, die als Untereinheit der Hydrosphäre Wasser in gefrorenem Zustand zum Inhalt hat, wie z. B. Schnee, Gletscher, Eis auf Meeren und Seen sowie Permafrostkörper.

Lithosphäre

Natursphäre, welche die oberste Schicht der Erdkruste, sowohl auf Kontinenten als auch unter dem Ozean umfasst und alles Krustengestein und den kalten, meist elastischen Teil des obersten Erdmantels einschließt. Vulkanaktivität wird nicht als Teil des Klimasystems betrachtet, obwohl sie Teil der Lithosphäre ist, sondern als äußerer Antrieb.

Mensch-Umwelt-System

Die Erde ist heute (seit Beginn des Anthropozäns) ein Mensch-Umwelt-System, in dem die klassische Trennung zwischen Mensch und Natur nicht mehr gilt, da die Gesellschaft in vielfältiger Weise mit der Umwelt untrennbar verbunden ist. In Bezug auf den Klimawandel wird dies durch die wechselhafte Rolle des Menschen als Verursacher und Betroffener zum Ausdruck gebracht.

Natur

Durch Naturgesetze bestimmte Welt, die bis zur Neolithischen Revolution (Sesshaftwerdung des Menschen) das System Erde bestimmte. Natur steht in den dualen Weltmodellen im Gegensatz zum Menschen bzw. zur Kultur.

Natursystem

Alle klassischen Natursphären (Litho-, Atmo-, Hydro- und Biosphäre) im System Erde umfassend. Das System Erde war bis zur Neolithischen Revolution (Sesshaftwerden des Menschen, Beginn der Landwirtschaft) ein reines Natursystem.

Ökosystemleistungen (auch Ökosystemdienstleistungen)

Das Konzept der Ökosystemleistungen dient dazu, den Nutzen ökologischer Systeme für die Gesellschaft im lokalen und regionalen Betrachtungsmaßstab zu bewerten. Im Kontext des Klimawandels wird das Konzept für die Bewertung positiver und negativer Folgen des Klimawandels in den Natursphären herangezogen.

Dabei wird zwischen Versorgungsleistungen (Güter, die direkt aus Ökosystemen entnommen werden), Regulierungsleistungen (z. B. Abschwächung von Extremereignissen durch Wasserrückhaltevermögen), kulturellen Leistungen (z. B. Erholung, Erleben und Bildung in der Natur) sowie Unterstützungs- oder Basisleistungen (z. B. Photosynthese, Stoffkreisläufe, Bodenbildung) unterschieden.

Pedosphäre
Die Pedosphäre umfasst das Subsystem der Böden. Sie entsteht aus der Schnittmenge der klassischen Natursphären Litho-, Atmo-, Hydro- und Biosphäre im oberflächennahen Bereich der Lithosphäre.

Reaktionsszeit
Zeitraum, der vergeht, bis die Folgen des von einem Treiber ausgehenden Impulses im Reaktionssystem sichtbar werden.

Resilienz
Die Fähigkeit eines Gesellschafts- oder Umweltsystems, Störungen aufzunehmen und gleichzeitig dieselbe Grundstruktur und Funktionsweisen zu bewahren, die Kapazität zur Selbstorganisation sowie die Kapazität, sich an Stress und Veränderungen anzupassen.

Risiko
Risiko ist ein Konzept zum Ausdruck für die Unsicherheit zukünftiger Entwicklungen. Der Begriff Risiko wird zwar in natur- und sozialwissenschaftlichen Disziplinen unterschiedlich definiert, aber allen ist der Fokus auf das mögliche Eintreten von Ereignissen mit negativen Folgen gemein.

Im Zuge der Auseinandersetzung mit Globalem Wandel generell und Klimawandel speziell muss Risiko jedoch im Sinne eines offenen Konzepts verstanden werden, das neben den potentiell negativen auch mögliche positive Entwicklungen, im Sinne von Chancen, betrachtet. Das Risiko wird oft als Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses und dessen Konsequenz dargestellt.

System
Ein System ist eine räumliche und/oder funktionale Einheit, in der Elemente so miteinander in Wechselwirkung stehen, dass sie sich strukturell gegenüber der sie umgebenden Umwelt abgrenzen (siehe als Beispiel Einzugsgebiet).

Umwelt
Umwelt umfasst die materielle Welt im Gegensatz zur geistigen Welt des Menschen. Dabei ist Umwelt keinesfalls als Synonymbegriff für Natur zu verstehen, sondern steht für beides, die Umwelt der Naturraumsphären sowie die vom Menschen geschaffene Umwelt.

Vulnerabilität (Verletzlichkeit)
Vulnerabilität drückt den Grad aus, in dem ein System gegenüber den negativen Folgeerscheinungen eines Impulses empfänglich ist. Im Falle des Klimawandels ist es die Anfälligkeit gegenüber negativen Folgen veränderter Klimabedingungen (Mittelwerte, Variabilität, Extremwerte).

1.1 Einleitung
1.1 Introduction

Band 2 des AAR14 (Austrian Assessment Report 2014) befasst sich mit den regionalen und lokalen Folgeerscheinungen (impacts) des Globalen Klimawandels. Die Inhalte bzw. Erkenntnisse sind eine grundlegende Voraussetzung für alle Anpassungsstrategien (vgl. Band 3). Innerhalb von Band 2 gibt Kapitel 1 einen Überblick über wesentliche theoretisch-konzeptionelle Grundlagen, die bei der Betrachtung von Folgeerscheinungen des Klimawandels wichtig sind. Ausgehend von Überlegungen zum Sphärenkonzept, das als ordnendes Schema für die Kopplung zwischen Treiber- und Reaktionssystemen zur Gliederung von Band 2 herangezogen wird (Abschnitt 1.2), folgt eine Diskussion zum Planeten Erde als ein Mensch-Umwelt-System sowohl aus theoretischer als auch aus forschungspolitischer Sicht (Abschnitt 1.3). Für das Verständnis der durch die Prozesse des Klimawandels induzierten Folgeerscheinungen sind drei Schnittstellen wesentlich, die in den folgenden Kapiteln behandelt werden:

1. Schnittstelle zwischen Natursystem und gesellschaftlichem System

Im Sinne des zugrunde gelegten Systemansatzes muss die Erde als ein Mensch-Umwelt-System verstanden werden. Dies gilt sowohl im globalen Betrachtungsmaßstab der Treiberebene als auch in den regionalen bzw. lokalen Skalen der Reaktionssysteme. Bei der hierzu nötigen Integration zum hybriden Mensch-Umwelt-System muss der klassische Dualismus zwischen Natur / Materie und Mensch / Geist überwunden werden. Neben der Diskussion allgemeiner Konzepte und zu Grunde liegender Weltanschauungen werden konkrete Schlüsselparameter hinterfragt, welche die Überwindung dieser Dichotomie und damit die Verbindung zu einem Mensch-Umwelt-System ermöglichen (Abschnitt 1.4).

2. Schnittstelle zwischen Treiber- und Reaktionssystem bzw. zwischen Impuls und Reaktion

Neben der rein inhaltlichen Kopplung zwischen Treiber- und Reaktionssystemen muss auch die zeitliche und räumliche Verbindung zwischen Impuls und Reaktion hinterfragt werden. In den komplexen Systemzusammenhängen des Klimawandels sind Ort und Zeit des Impulses oftmals nicht mit Ort und Zeit der Reaktionen übereinstimmend, so dass hierbei Übergänge in Raum- und Zeitmaßstäben berücksichtigt werden müssen (Abschnitt 1.5 und 1.6).

3. Schnittstelle zwischen Maßstabsebenen

Mit dem Übergang zwischen der Treiberebene des globalen Klimawandels bzw. seinen regional differenzierten Ausprägungen und regionalen / lokalen Dimensionen der Reaktionssysteme in den einzelnen Sphären sind räumliche Maßstabssprünge verbunden. In einem einfachen Beziehungsgeflecht zwischen Aktion und Reaktion werden diese durch downscaling-Verfahren abgebildet. In einem komplexeren Systemverständnis müssen durch Rückkopplungen aber auch upscaling-Prozesse berücksichtigt werden.

Neben der reinen Darstellung und Analyse der Folgeerscheinungen des Klimawandels hat deren Bewertung eine wesentliche Bedeutung. Erst die Betrachtung des Systems Erde aus dem Blickwinkel der Mensch-Umwelt-Interaktion erlaubt diesen Bewertungsschritt, da Wandel in reinen Natursystemen als einzige Konstante gesehen werden muss und damit per se vollkommen wertneutral ist. Das für die Bewertung der Folgen des Klimawandels in diesem Band angewandte Konzept der Ökosystemdienstleistungen bietet gute Möglichkeiten zur Verknüpfung zwischen Gesellschaft und Umwelt und stellt ein Instrument für nachvollziehbare Wertzuweisungen dar (Abschnitt 1.8).

1.2 Sphärenkonzept als Gliederungsprinzip
1.2 Concept of a sperical earth as structural principle

Der Kopplung zwischen Treiber- und Reaktionssystemen wird ein erweitertes geowissenschaftlich-geographisches Sphärenkonzept (vgl. Sintubin, 2008) zugrunde gelegt, das auch als ordnendes Schema für die Gliederung von Band 2 Anwendung findet.

Erste Überlegungen zur Unterteilung der Erde in Sphären lassen sich im Kontext der Diskussion um die Gestalt der Erde bis in die Antike zurückverfolgen (z. B. Dicks, 1970). Primär lassen sich dabei vier Sphären unterscheiden, die den Grundelementen der Natur entsprechen und als Geoökofaktoren im System Erde zusammenwirken: Luft – Atmosphäre, Wasser – Hydrosphäre, Gestein – Lithosphäre und Leben – Biosphäre (einem Gedanken von Hutton, 1785 folgend und von Suess, 1875 erstmals formuliert). Neben diesen klassischen Sphären des Natursystems werden in den Naturwissenschaften teilweise weitere Sphären als Subeinheiten (Kryosphäre als Teil der Hydrosphäre und Reliefsphäre als Teil der Lithosphäre; siehe Büdel, 1969) oder Sphären, die durch ein komplexes Zusammenwirken gekennzeichnet sind (Pedosphäre), thematisiert. Im 20. Jahrhundert wurde das Sphärenkonzept immer wieder intensiv diskutiert, so im Zuge der Diskussion um einen biotischen (z. B. Teilhard De Chardin, 1956) oder ökologischen Biosphärenbegriff (z. B. Hutchinson, 1970), oder im Zuge der Diskussionen zum Landschaftsbegriff (z. B. Carol, 1956; Neef, 1963; Uhlig 1971; siehe auch Leser, 2005). Heute findet das Sphärenkonzept u. a. in internationalen Forschungsprogrammen Anwendung (z. B. IGBP – International Geosphere-Biosphere Programme).

Entsprechend der klassischen Dichotomie zwischen Natur und Mensch / Gesellschaft steht den Natursphären die Anthroposphäre gegenüber (siehe z. B. beim Syndromansatz des WBGU, 1996). Im Hinblick auf den steuernden Einfluss des Klimas wird im Band 2 auf Seite des Natursystems zwischen Hydrosphäre (Kapitel 2), Biosphäre (Kapitel 3), Reliefsphäre (Kapitel 4) und Pedosphäre (Kapitel 5) unterschieden. Die gesellschaftliche Seite wird in Kapitel 6 (Anthroposphäre) vorgestellt, in dessen Rahmen die Aspekte Gesundheit, Soziales, Ökonomie, Tourismus, Naturgefahren, Raumplanung sowie Infrastruktur differenziert angesprochen werden (Abbildung 1.1).

Die Kopplung zwischen den primären Folgen des Klimawandels auf die Natursphären und den daraus resultierenden sekundären Auswirkungen auf die Gesellschaft wird im Band 2 durch die Funktion von Ökosystemdienstleistungen hergestellt. In Band 3 wird der Umgang mit Ursachen (Mitigation) und

Folgen (Adaptation) des Klimawandels thematisiert. Dabei werden neben allen gesellschaftlichen Teilbereichen auch Aspekte der Hydro- und Biosphären diskutiert (siehe Abbildung 1.1).

Der Atmosphäre kommt im Zuge des globalen Klimawandels eine Sonderstellung zu. Aufgrund des anthropogen verursachten Treibhauseffekts nimmt sie die Rolle des Treibersystems oder eines Katalysatorsystems – wenn man die Aktivitäten in der Anthroposphäre als Ausgangspunkt betrachtet – ein, das sich auf alle anderen Natursphären sowie die Gesellschaft auswirkt, so dass diese zu Reaktionssystemen werden. Die Kopplung bzw. die klimatische Treiberwirkung zwischen der Atmosphäre und den anderen Natursphären erfolgt entweder direkt oder indirekt; gleiches gilt auch für die Rückkopplungen, durch die diese ihrerseits ebenfalls unmittelbar oder mittelbar auf das Klimasystem einwirken. In den Reaktionssystemen wird der Einfluss des Klimawandels in als Indikatoren wirkenden raumbezogenen Elementen oder Prozessen oft dadurch erkennbar, dass sicht-, mess- oder modellierbare Zustandsänderungen die Umgestaltung des Systems anzeigen (Stötter, 1994). Im soziokulturellen Kontext sind die Einflüsse des Klimawandels (z. B. Werte- und Wahrnehmungswandel) auf Grund ihres qualitativen Charakters oft nur schwer und mitunter nicht mit klassischen wissenschaftlichen Methoden nachvollziehbar. Durch die vielfältigen Rückkopplungen zwischen dem soziokulturellen Subsystem, das simultan als verursachende, betroffene und potentiell regulierende Instanz wirksam sein kann und den anderen Teilsystemen sind gerade diese schwierig fassbaren und kaum quantifizierbaren Einflüsse von großer Bedeutung.

Aus ökologischer Sicht eignen sich Elemente oder Prozesse dann besonders gut als Klimaindikatoren, wenn ihr Verhalten eng vom Klima abhängig ist bzw. es sich mit sich verändernden Energie- und Materieflüssen relevanter Klimaelemente korrelieren lässt. Indikatoren für den Klimawandel können also Landschaftselemente im Sinne von Bobek und Schmithüsen (1949) sein, die entweder als Gesamtheit Veränderungen des Landschaftssystems anzeigen oder einzelne mess- oder modellierbare Parameter, die das klimaabhängige Verhalten eines Landschaftselementes widerspiegeln und es damit quantifizierbar machen. Am Beispiel der Kryosphäre lässt sich der Zusammenhang zwischen Natursphäre und Elementen sowie Parametern aufzeigen, die eine qualitative und quantitative Erfassung der Folgen des Klimawandels ermöglichen (vgl. Tabelle 1.1). Am Beispiel der Hochgebirgskryosphäre lassen sich auch die unterschiedlichen Kopplungen zwischen Klimawandel und den reagierenden Systemelementen gut darstellen. Aufgrund der direkten Abhängigkeit von der Art und Menge des Niederschlags sowie den atmosphärischen Energieflüssen reagiert beispielsweise die Schneedecke sehr kurzfristig und unmittelbar. Reaktions- und Anpassungszeit der saisonalen Schneedecke liegen in der Dimension von Stunden bis Monaten. Gänzlich anders stellt sich die Kopplung zwischen Klimawandel und der Reaktion von Permafrost dar. Zum einen ist der Permafrostkörper ein träger Energiespeicher („Kältespeicher"), zum anderen erfolgt die Energieübertragung zwischen Atmosphäre und Permafrost indirekt über ein System komplexer Energieflüsse, an denen Lithosphären-, Atmosphären- und Hydrosphärenprozesse beteiligt sind. Entsprechend



Abbildung 1.1 Zusammenwirken der in Band 2 und 3 behandelten Natur- und Anthroposphäre(n)
Figure 1.1 Interaction of natural spheres and anthroposphere discussed in volumes 2 and 3

liegen die zeitlichen Dimensionen der Reaktionszeit im Bereich von Jahren bis Jahrzehnten und der Anpassungszeit im Bereich von mehreren Jahrzehnten bis zu Jahrhunderten, vielleicht sogar einem Jahrtausend (Haeberli, 1990). Für die natürlichen Systeme gilt in der Regel: Je weniger das Reaktionssystem direkt an das Treibersystem gekoppelt ist und je länger deshalb der Zeitraum zwischen dem beginnenden Impuls und der Reaktion bzw. Anpassung ist, umso schwieriger ist die eindeutige kausale Zuordnung bzw. Einordnung von Veränderungen als Folgen des globalen Klimawandels. Bei soziokulturellen Systemen muss eine indirekte Kopplung nicht zwangsläufig eine längere Reaktionszeit mit sich bringen. Da hier die Kopplungen oftmals sehr komplex und auch diffus erfolgen, können – z. B. durch Medienberichte oder andere Diskursformen verursacht – die gesellschaftlichen Reaktionen auf den Impuls des Klimawandels sogar dem „natürlichen" Eintreten der Reaktion vorausgehen.

Erst die Gesamtheit aller durch entsprechende Indikatoren (Landschaftselemente bzw. Parameter) repräsentierten Natursphären erlaubt es, die Auswirkungen des globalen Klimawandels auf einen Raum und die daraus resultierenden Folgeerscheinungen für die Anthroposphäre darzustellen (Stötter, 1994). Dabei gilt zu beachten, dass die Folgeerscheinungen für die Anthroposphäre entweder direkt kausal mit den veränderten Natursystemen (bzw. deren Indikatoren) in einem Wirkungszusammenhang stehen können oder aber einem interpretativen Prozess unterliegen, der durch ein reines Verständnis der natürlichen Indikatoren nicht nachvollziehbar ist.

Die Kopplung zwischen dem Treibersystem und den Reaktionssystemen wird durch eine Reihe von Schnittstellen charakterisiert (Abbildung 1.2).

1.3 Globales System Erde
1.3 Global Earth System

Die Erkenntnis, den Planeten Erde als ein System zu betrachten, erfuhr durch die Verbreitung der ersten, die gesamte Erde abbildenden Satellitenbilder in den 1960er Jahren einen starken Impuls. Damit einher gehen erste globale Betrachtungen zum System Erde und seinen Grenzen (z. B. Meadows et al., 1972; Barney, 1982). In weiterer Folge wurden, angeregt durch Organisationen wie ICSU (International Council for Science) und UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) auch erste wissenschaftliche Programme (1980: World Climate Research Programm, 1987: International Geosphere-Biosphere Programme 1991: International Programme on Biodiversity) sowie Organisationen (1988: Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) ins Leben gerufen, die eine umfassende Betrachtung des Systems Erde zum Inhalt haben. Das zugrundeliegende Verständnis sah die Erde als ein Natursystem, in dem den Menschen, wenn überhaupt, nur eine periphere Rolle zukam.

Aus heutiger Sicht wird das System Erde nicht mehr als ein reines Natursystem, sondern als ein Mensch-Umwelt-System verstanden, bei dessen Formung dem Menschen eine zentrale Rolle zukommt. Mit Beginn des Sesshaftwerdens des Menschen sowie der Einführung von Ackerbau und Viehzucht (neolithische Revolution) griff der Mensch als Akteur lokal und regional immer mehr in die Natursysteme ein und wirkte damit an ihrem Wandel mit. Es begann eine Zeit der Koexistenz von Mensch-Umwelt-Systemen neben noch reinen Natursystemen, wobei die Bedeutung der Mensch-Umwelt-Systeme langsam, aber stetig zunahm (vgl. Ehlers, 2008). Die Aktionen der Menschen und die Reaktionen des Systems lagen in dieser

Tabelle 1.1 Landschaftselemente und als Klimaindikatoren wirkende Parameter der Kryosphäre im Hochgebirge. Quelle: zusammengestellt nach Nye (1963); Paterson (1969); Jóhannesson (1985); Jóhannesson et al. (1989); Patzelt und Aellen (1990); Haeberli (1990, 1991); Stötter (1994)

Table 1.1 Environmental elements of high mountain regions and parameters of the cryosphere understood as climate indicators. Source: compiled after Nye (1963); Paterson (1969); Jóhannesson (1985); Jóhannesson et al. (1989); Patzelt and Aellen (1990); Haeberli (1990, 1991); Stötter (1994)

Landschaftssphäre	Klimaindikator		Kopplung	
Kryosphäre	Landschaftselement	Parameter	Reaktionszeit	Anpassungszeit
	Schnee	Schneegrenze Schneedeckendauer	h–d	d–mon
	Gletscher	Schneegrenze (Gleichgewichtslinie) Zungenlänge Volumen	$n\,10^0 – n\,10^1 a$	$n\,10^0 – n\,10^1 a$
	Permafrost	Verbreitung Untergrenze	$n\,10^0 – n\,10^1 a$	$n\,10^1 – n\,10^3 a$

Phase meist zeitlich und räumlich nahe zusammen, so dass der kausale Zusammenhang zwischen Impuls oder Ursache / Verursacher und Reaktion in der Regel deutlich erkennbar ist.

Seit Beginn der Industrialisierung hat diese Entwicklung eine zunehmende Beschleunigung erfahren, da durch die Inwertsetzung fossiler Energierohstoffe die Gestaltungsmöglichkeiten durch den Menschen neue Dimensionen erreichten und schließlich auch eine demographische Entwicklung einleiteten, die in der aktuellen Weltbevölkerung von seit 2011 über sieben Milliarden vorläufig gipfelten. Die Umgestaltung des Systems Erde ist inzwischen so weit voran geschritten, dass es mit wenigen Ausnahmen kaum noch Systeme gibt, die von menschlichen Aktivitäten nicht beeinflusst sind. Diese globale Wirksamkeit des menschlichen Handelns hat Crutzen und Stoermer (2000) dazu veranlasst, den Begriff Anthropozän vorzuschlagen, dessen Anerkennung als neue geologische Epoche inzwischen intensiv diskutiert wird (Zalasiewicz et al., 2011). Als Konsequenz muss das System Erde heute als Mensch-Umwelt-System betrachtet werden, eine Erkenntnis, die gleichermaßen im größeren Maßstab als auch auf regionaler und lokaler Ebene gilt. In allen Betrachtungsskalen sind diese Mensch-Umwelt-Systeme als offene Systeme zu verstehen, die mit ihrer Umgebung durch einen immer schnelleren Austausch von Materie, Energie und Information kommunizieren.

Dieser Erkenntnis wird auch dadurch Rechnung getragen, dass inzwischen die Ausrichtung der globalen Forschungsinitiativen den Menschen als gestaltenden Akteur berücksichtigen (z. B. 1996: International Human Dimension Programme on Global Environmental Change). Explizit wird dies durch die Amsterdam Declaration in der Gründung der „Earth System Science Partnership" im Jahr 2001 zum Ausdruck gebracht. Als eine nahtlose Fortsetzung dieser Entwicklung kann auch das United Nations International Year of Planet Earth (2007 bis 2009) gesehen werden, in dessen Rahmen auch gesellschaftliche Themenfelder, wie z. B. Gesundheit oder Megacities, adressiert wurden (Woodfork und de Mulder, 2011).

Im Jahr 2011 wurde vom ICSU (International Council for Science) die neue Initiative „Future Earth: New global platform for sustainability research" ins Leben gerufen, die innerhalb eines 10-Jahres-Programms Antworten auf die Folgeer-

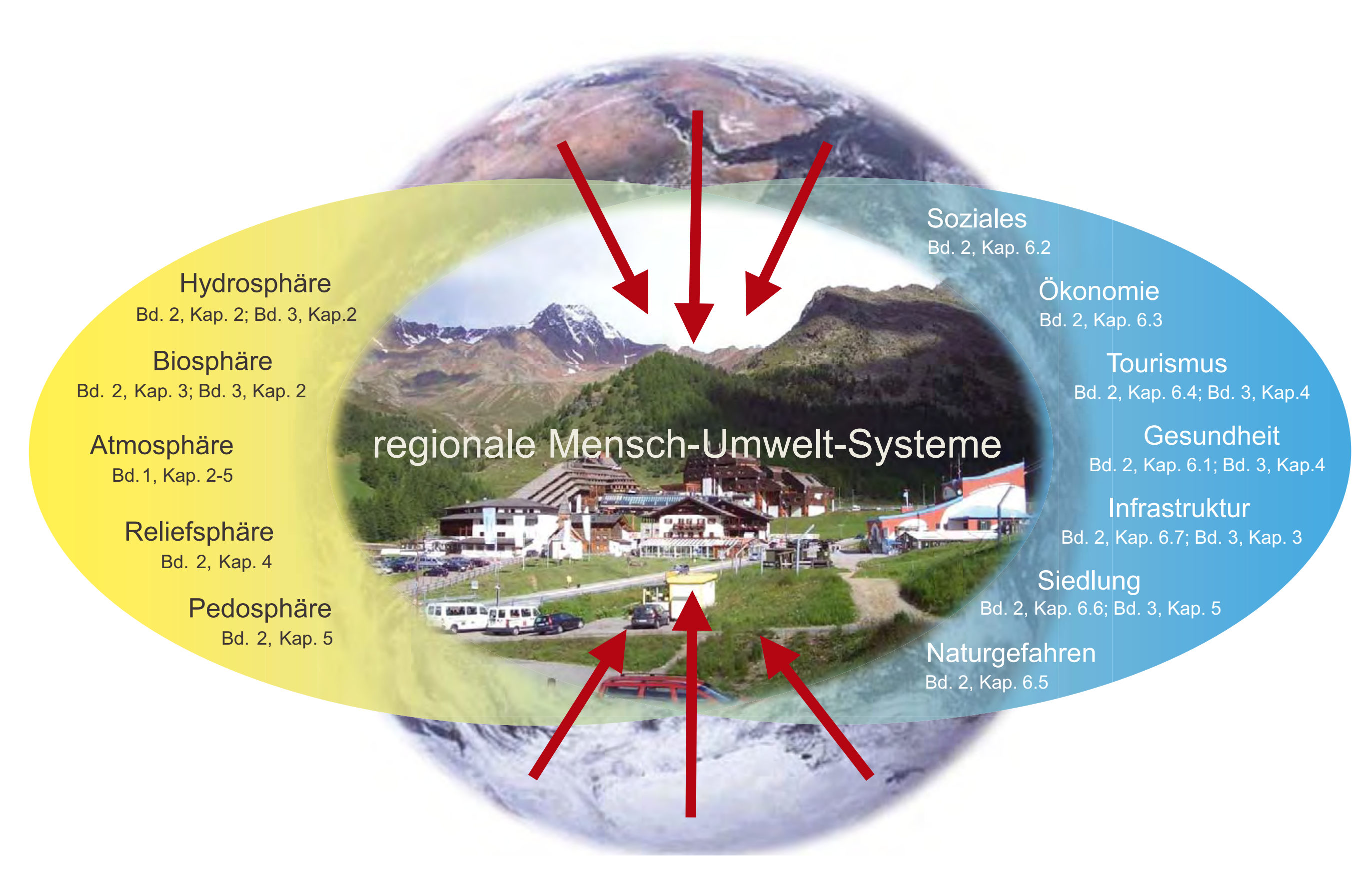


Abbildung 1.2 Schnittstellen zwischen globalem Treibersystem und lokalen / regionalen Mensch-Umwelt-Systemen als Reaktionssystem zwischen Natur- und Anthroposphäre

Figure 1.2 Interfaces between global driver system und local / regional human-environment systems as response systems between natural spheres and anthroposhere

scheinungen des globalen Umweltwandels hervorbringen soll, um eine Transformation der Gesellschaft in Richtung Nachhaltigkeit zu ermöglichen.

In der politischen Sphäre schlägt sich das verstärkte Bewusstsein für die Problematik globaler Zusammenhänge und für die notwendige Suche nach Lösungsansätzen seit geraumer Zeit in der Arbeit verschiedener „Weltkommissionen" sowie im „Marathon" der Weltkonferenzen der letzten Jahrzehnte nieder (z.B. 1992: United Nations Conference on Environment and Development, Rio de Janeiro; 2000: Millennium Summit, New York; 2002: World Summit on Sustainable Development (Rio+10), Johannesburg; 2012: United Nations Conference on Sustainable Development (Rio+20), Rio de Janeiro).

1.4 Überwindung der Mensch-Umwelt Dichotomie
1.4 Overcoming the human vs. environment dichotomy

Seit dem Altertum ist das Verhältnis zwischen Mensch und Natur eine zentrale Frage philosophischer Diskussionen und wurde demzufolge immer wieder thematisiert. In der Moderne standen dabei Ansätze im Vordergrund, die den dichotomen Charakter dieser Beziehung zum Inhalt hatten (z.B. Descartes, 1641: res extensa vs. res cogitans).

In zunehmendem Maße wird heute diese Trennung wieder hinterfragt. Diese neuerliche Wiederentdeckung des Zusammendenkens von Natur und Kultur geht zum einen auf theoretische Überlegungen zurück (z.B. „hybride Netzwerke" im Sinn der Actor Network Theory von Latour, 1998; „Zusammenhang zwischen Sinn und Materie" nach Zierhofer, 2002; aber auch „Drei-Welten-Theorie" von Popper, 1973), zum anderen auf die sehr pragmatische Erkenntnis, dass alle aktuellen globalen Problemfelder nur so verstanden und in Folge zielorientierte Lösungen nur so entwickelt werden können. Denn einerseits war es die Mensch-Umwelt-Dichotomie, welche den Siegeszug des Menschen als Hauptakteur des Wandels vorantrieb, andererseits ist es eben diese Entkopplung von Mensch und Natur, die zumindest teilweise einem nicht nachhaltigen Ressourcenverbrauch und der rücksichtslosen Ausbeutung der Natur zu Grunde liegt. In der Entwicklung einer globalen Perspektive zur Lösung globaler Probleme ist es also angebracht, auch nicht-eurozentrische Betrachtungsweisen des Zusammenhangs zwischen Menschen und Natur zu inkludieren. Prinzipien des ganzheitlichen Nicht-getrennt-seins und ein auf Harmonie anstatt auf Konfrontation basierter Umgang mit dem Wandel sind z.B. im Hinduismus, Buddhismus und Daoismus tief verwurzelt. Peripher haben entsprechende philosophische Strömungen seit Beginn der erneuten systemischen Betrachtung von Mensch und Natur in den 1970er Jahren immer wieder Beachtung gefunden (z.B. „small is beautiful", Schumacher, 1973). In Zukunft können prinzipielle Erkenntnisse außerhalb abendländisch geprägten Denkens auch in nicht-spirituellen Betrachtungsweisen durchaus an Bedeutung gewinnen und so wesentlich zu konzeptionellen Lösungsansätzen beitragen.

In Wissenschaft, Politik und Öffentlichkeit hat das Interesse an den globalen Herausforderungen in ökologischen, sozioökonomischen und politischen Zusammenhängen innerhalb des letzten Jahrzehnts stark zugenommen, zum Teil auch aus der Erkenntnis heraus, dass es sich hierbei um existentielle, für das Überleben der globalen Gesellschaft wichtige Fragen handelt (Ehlers, 2005, 2008). Die Komplexität globaler Veränderungen, die von den Prozessen im Naturhaushalt (z.B. Klimaveränderungen, Ressourcenverbrauch) über die wirtschaftlichen, sozialen und kulturellen Folgen der Globalisierung (z.B. „Triadisierung" der Weltwirtschaft, Verschärfung der immer größeren Unterschiede zwischen GlobalisierungsgewinnerInnen und -verliererInnen, Konfliktzunahme) bis hin zu den sich verändernden politischen Rahmenbedingungen reichen (z.B. Auflösung der „Blockwelten", Neoliberalismus, Veränderung politischer Akteurskonstellationen), erfordern neue, ganzheitliche Sichtweisen. Dies gilt sowohl bei der wissenschaftlichen Analyse der Hintergründe, Prozessabläufe und Folgewirkungen als auch bei der Suche nach langfristig wirksamen Lösungsansätzen sowie für einen entsprechend notwendigen Wertewandel (z.B. Kates et al., 2001; Gallopín, 2006; Becker und Jahn, 2006; WBGU, 2007).

Das Streben nach einer Wissenschaft, die das hybride Mensch-Umwelt-Verhältnis als zentrales Erkenntnisobjekt behandelt, hat in den letzten Jahren zu intensiven Diskussionen geführt. Das sich gegenseitige Bedingen der menschlichen und natürlichen Subsysteme bzw. deren Einfluss auf das Gesamtsystem stellt die Grundannahme neuer wissenschaftlicher Ansätze dar, wie „Coupled Human-Environment Systems" (CHES) (Berkes et al., 2003) oder „Social Ecological Systems" (SES) (Turner, 2010). Eine wesentliche Auseinandersetzung mit dieser Fragestellung erfolgt dabei innerhalb der Geographie (z.B. Weichhart, 2005), in der die integrative Betrachtung von natur- und gesellschaftswissenschaftlicher Seite seit dem 19. Jahrhundert verankert ist und wo heute auf der Basis einer stark theoriegeleiteten Diskussion nach neuen Schnittfeldern gesucht wird (z.B. Weichhart, 2003; Wardenga und Weichhart, 2007).

Wesentliche Ansätze, die an der Schnittstelle zwischen Mensch und Umwelt aktuell diskutiert und auf ihre Praxistauglichkeit hinterfragt werden, sind dabei:

- Risikoforschung
- Humanökologie
- Sustainability Science

1.4.1 Risikoforschung

Risikokonzepte besitzen ein hohes Maß an Integrationspotential, da sie intrinsische Aspekte gesellschaftlicher und natürlicher Systeme miteinander verbinden (z. B. Bohle und Glade, 2008; Veulliet et al., 2009).

Die Wurzeln der Risikobetrachtung lassen sich in den mittelalterlichen Mediterranraum zurück verfolgen, als Kaufleute die Begriffe „risco" bzw. „risico" zur Charakterisierung der mit dem Seehandel verbundenen Gefahren, aber auch der damit verbundenen Chancen verwendeten (Banse, 1996).

Seit den 1950er Jahren wird Risiko in unterschiedlichen Kontexten von verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen thematisiert (Fuchs et al., 2004). Dabei sind allen Anwendungen die Aspekte Zukunftsorientierung und Unsicherheit gemein. Heute lassen sich drei Hauptzugänge in der Risikoforschung unterscheiden (Dikau und Weichselgartner, 2005; Müller-Mahn, 2007; Renn et al., 2007).

Sehr früh setzte sich die wissenschaftliche Risikobetrachtung in einem technologischen Bereich, nämlich der Kernenergie, durch. Vor allem in den USA sind probabilistische Betrachtungen für Genehmigungsverfahren entscheidend, während sie in Europa zwar in der Planung und für Prioritätensetzungen bei Sicherheitsmaßnahmen herangezogen werden, wobei bei der Genehmigung aber deterministische Ansätze, unter Ausschluss eines sogenannten Restrisikos, dominieren. Natur- oder ingenieurwissenschaftliche Risikoansätze zielen vor allem auf die Analyse und Bewertung von Naturgefahrenprozessen ab, wobei der Frequenz-Magnituden-Beziehung eine zentrale Bedeutung zukommt. Mit ihren Untersuchungen zu kurzfristigen Überflutungen, deren Wahrnehmung und Bewertung sowie der Ableitung von Anpassungsmaßnahmen führten Kates (1962) und White (1964) das Risikokonzept in die Naturgefahrenforschung ein. Auf Grundlage dieses Ansatzes, der physisch-geographische, sozialwissenschaftliche sowie wirtschaftliche Aspekte umfasst, wurde von Petak und Atkisson (1982) eine erste umfassende Studie zum Naturgefahrenrisiko durchgeführt. Inzwischen werden diese stark auf den Prozess orientierten Konzepte durch umfassendere, integrative Risikomanagementstrategien abgelöst (Ammann, 2001; Stötter et al., 2002; Kienholz, 2003).

Wirtschaftswissenschaftliche bzw. durch das Versicherungswesen vorangetriebene Ansätze fokussieren vor allem auf die Risikobewertung und -monetarisierung (Leiter und Pruckner, 2008; Luechinger und Raschky, 2009, Prettenthaler et al., 2012). Das im Zuge versicherungsmathematischer Risikoberechnungen angewandte Konzept des sogenannten Value at Risk (VaR) hat sich dabei als universell einsetzbare Kenngröße erwiesen, da sie naturwissenschaftliche Wahrscheinlichkeitsberechnungen und ökonomische Größen miteinander kombiniert und somit ökonomische Klimarisiken unterschiedlicher Sektoren miteinander vergleichbar macht (Töglhofer et al., 2012).

Eine wichtige Rolle spielen auch die Grenzen bestehender Versicherungsinstrumente bei potentiellen extremen Schadensereignissen (Kunreuther, 2001; Kunreuther und Pauly, 2004; Thieken et al., 2006; Raschky und Weck-Hannemann, 2007). Theoretische Konzepte zur Monetarisierung alpiner Naturgefahrenschäden wurden von Altwegg (1988, 1989) und Wilhelm (1997, 1999) entwickelt und beispielsweise für Lawinen auf Gemeindeebene (Fuchs, 2004; Keiler, 2004) bzw. für Hochwässer regional (Raschky et al., 2008) umgesetzt.

Bei der sozialwissenschaftlichen Auseinandersetzung mit Risiko lässt sich keine einheitliche Theorie erkennen, die Ansätze kreisen zumeist um die Bereiche der Risikowahrnehmung, -akzeptanz und -kommunikation. Daneben fokussieren Untersuchungen auf die soziale Einbettung, die Entwicklung von Bewältigungsstrategien und in zunehmendem Maße auf Aspekte von Risikogovernance (risk governance). Neben einem formal-normativen Zugang, sind psychologisch-kognitive Ansätze sowie kulturell-soziologische Ansätze zu nennen (Kuhlmann, 1981; Fermers und Jungermann, 1992; Berg et al., 1994). Während in früheren Untersuchungen die für die individuelle Wahrnehmung bestimmenden Faktoren im Vordergrund standen (z. B. Mileti et al, 1975; Jungermann und Slovic, 1993; Banse und Bechmann, 1998), haben später Überlegungen zur kulturellen Konditionierung von Risikowahrnehmung und -akzeptanz an Bedeutung gewonnen (z. B. Nowotny, 1982; Vaughan und Nordenstam, 1991; Beck, 1992; Renn et al., 2007).

Gemäß der unleugbaren Tatsache, dass alle potentiellen zukünftigen Entwicklungen des Klimawandels und seiner Folgen zu einem hohen Grad durch Unsicherheit geprägt sind, können sie im Lichte eines Risikokonzepts bestens diskutiert werden. Da Risikoanalysen zum besseren Verständnis der Eintrittswahrscheinlichkeit und der Magnitude eines zu erwartenden Klimafolgenprozesses beitragen, sind sie wesentliche Voraussetzung für die Entwicklung und Umsetzung von

Anpassungsmaßnahmen. Es ist aber unbedingt zu berücksichtigen, dass es sich bei allen regionalen / lokalen Folgewirkungen des globalen Klimawandels auf Gesellschaft und Umwelt sowohl um positive als auch negative Konsequenzen handeln kann (Schneider et al., 2007, UNEP, 2007).

In diesem Sinn kann bei Forschungen zum Klimawandel Risiko als Ausdruck für die unsichere, offene Zukunft gesehen werden. Da dieses sowohl positive als auch negative Optionen für die Zukunft beinhaltet, muss der vorwiegend negativ konnotierte Risikobegriff durch ein neutrales Verständnis ersetzt werden, das Risiko sowohl für Chancen, die es in Wert zu setzen gilt (im Sinne von good risk), als auch im klassischen Sinne für negative Folgen anwendet, die es im Sinne von bad risk zu vermeiden gilt (Campbell und Vuolteenaho, 2003; Stötter und Coy, 2008). Zentral in der negativen, nur auf eine mögliche Verschlechterung fixierten Konnotation von Risiko ist auch eine generell ablehnende Haltung gegenüber Unsicherheit. Hier können auf Szenarien basierte Ansätze im Umgang mit einer ungewissen Zukunft richtungsweisend sein, wie sie zunächst im militärstrategischen, später im geschäftsstrategischen Bereich der Organisationsentwicklung und dem Change Management zum Einsatz kamen. Diese ermöglichen, unabhängig von der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses, eine Entwicklung optimaler Handlungskonsequenzen und emanzipieren AkteurInnen aus einer passiven Rolle heraus zu aktiven GestalterInnen ihrer Zukunft. Es überrascht daher nicht, dass Szenarienansätze sich angesichts der großen Unsicherheiten im Klimawandelkontext zunehmender Popularität erfreuen.

Die Verbindung zwischen dem beeinflussenden Prozess und dem exponierten System wird durch die Sensitivität gegenüber der Einwirkung bestimmt. In den meisten Risikokonzepten sind Vulnerabilität (z. B. Chambers, 1989; Hollenstein et al., 2002; Thieken et al., 2005) Resilienz (z. B. Holling, 1973; Walker et al., 2004; Bohle, 2007) und Kapazität jene Faktoren (Gallopín, 2006), welche die Dimension des Risikos und letztendlich die Anpassungsfähigkeit des Mensch-Umwelt-Systems steuern (siehe Abschnitt 1.6).

1.4.2 Humanökologie – Soziale Ökologien

Basierend auf den Arbeiten der Chicagoer Schule der Sozialökologie (Moore, 1920; Barrows, 1923), die eine sozialwissenschaftliche Neuinterpretation des Ökologiekonzepts durchführte, wurde in den 1920er Jahren das Konzept der Humanökologie als eine Disziplin entwickelt, die sich mit den Wirkungszusammenhängen und Interaktionen zwischen Gesellschaft, Mensch und Umwelt beschäftigt. Diese löste einen Impuls zur Ökologisierung in vielen gesellschaftswissenschaftlichen Disziplinen aus (Weichhart, 1995; siehe Überblick bei Singh et al., 2013). Dieser Entwicklung lag zum einen das Streben vieler Einzelwissenschaften nach einer stärkeren ganzheitlichen Orientierung, zum anderen die Annahme einer höheren Problemlösungskompetenz zugrunde. Die wachsende Wahrnehmung globaler Umweltprobleme, im deutschsprachigen Raum teils durch Schwab (1958), global wohl durch Carson (1962) wegweisend stimuliert sowie die Entstehung von Naturschutzbewegungen führte in den 1960er und 1970er Jahren zur Etablierung der Humanökologie im Sinne eines disziplinübergreifenden Arbeitsgebiets (Young, 1974). In dem Bewusstsein, dass diese Umweltprobleme gesellschaftliche Probleme und nur durch die über Fachgrenzen hinausgehende Erforschung von Mensch-Umwelt-Interaktionen lösbar waren, kam es in Folge zur Gründung interdisziplinärer Organisationen, die quasi quer zu den traditionellen Fachdisziplinen ausgerichtet waren (z. B. 1969: Commonwealth Human Ecology Council; 1978: International Organization for Human Ecology; 1981: Society for Human Ecology).

Ein aktuelles theoretisches Konzept zur Überwindung der Dichotomie zwischen Natur und Gesellschaft wird durch das Modell der Gesellschaft-Umwelt-Beziehungen vorgestellt, das am Institut für Soziale Ökologie der Alpen-Adria Universität Klagenfurt entwickelt wurde (Fischer-Kowalski et al., 1997; Fischer-Kowalski und Weisz, 1999). Dabei werden im Zuge der Kolonisierung der materiellen Welt Artefakte gebildet und über den als gesellschaftlicher Metabolismus bezeichneten Energie- und Materieaustausch physisch-materielle Verbindungen zwischen der sinn- und kulturgeprägten Gesellschaft und Ökosystemen hergestellt. In engem Zusammenhang mit den Ansätzen dieser Schule sind auch frühere Diskussionen zur Interaktion und dem gegenseitigen Formen von Kultur und Natur in der Kulturanthropologie zu sehen (z. B. Vayda und McCay, 1975).

Aktuell wird auch ein zweites sozialökologisches Konzept intensiv diskutiert, das vom Institut für sozial-ökologische Forschung in Frankfurt entwickelt wurde (Becker und Jahn, 2000, 2006). In diesem Ansatz wird die Soziale Ökologie als „Wissenschaft von den gesellschaftlichen Naturverhältnissen" verstanden, die sich auf die, durch die Politisierung der Natur in den 1980er Jahren sichtbar gewordene, Problematik ständig wechselnder Konstellationen zwischen Gesellschaft und Umwelt richtet. Bei diesem sehr pragmatischen Zugang geht es vor allem darum, wie in einer globalisierten Welt die krisenhaften Beziehungen zwischen Gesellschaft und Natur erkannt, begriffen und gestaltet werden können. Bei der Suche nach adäquaten Antworten kommt bei diesem Konzept

der Sozialen Ökologie der Transdisziplinarität eine zentrale Bedeutung zu.

Nicht vergessen werden sollen in diesem Zusammenhang, wenn es um eine politisierte Umwelt geht, die Beiträge aus der Politischen Ökologie (z. B. Blaikie et al., 1994; Bryant und Bailey, 1997). Eng verknüpft mit der Entwicklungsgeographie, der Politischen Ökonomie und der Kulturanthropologie sind durch ungleiche Machtverhältnisse zwischen AkteurInnen gekennzeichnete Mensch-Umwelt-Interaktionen, durch die der Gesellschaft aus bestehenden Naturverhältnissen Nutzen aber auch Schaden zu teil werden kann, von zentralem Erkenntnisinteresse.

1.4.3 Sustainability Science

Ebenso wie beim Ansatz der Sozialen Ökologie steht auch beim Ansatz der Sustainability Science (Kates et al., 2001) der Zusammenhang zwischen menschlich-gesellschaftlichem Handeln und der natürlichen Umwelt im Mittelpunkt und zwar im Sinne eines Wirkungsgefüges, bei dem Gesellschaft und Natur als „gekoppelte Systeme“ sich gegenseitig determinieren. Das Verständnis dieser nicht linearen, komplexen und selbst organisierten Systeme und die darauf basierende Ableitung von Lösungsvorschlägen für komplexe gesellschaftliche Probleme werden als die zentrale Forschungsaufgabe des 21. Jahrhunderts gesehen (WBGU, 2007).

Dabei lassen sich die Grundprinzipien von Sustainability Science im Sinne einer „neuen Wissenschaft“ nach Gallopín (2004) folgendermaßen umschreiben:

- Die neue Wissenschaft ist sozial-ökologisch: Sie bringt Umwelt- und Entwicklungsforschung dadurch zusammen, dass sich beide auf Natur-Gesellschafts-Interaktionen konzentrieren.
- Die neue Wissenschaft ist integrativ: Sie verbindet Natur- und Sozialwissenschaften, unterschiedliche gesellschaftliche Handlungsbereiche, WissenschaftlerInnen und PraktikerInnen wirken bei Problemlösungen zusammen.
- Die neue Wissenschaft ist grundlegend: Sowohl Skalenprobleme, nicht-lineare Prozesse und Komplexität, sowie die Einheit von Natur und Gesellschaft müssen bearbeitet werden.
- Die neue Wissenschaft ist regional und ortsgebunden: Die Forschung vollzieht sich dort wo die Menschen und die Ökosysteme sind, wo Übergänge möglich sind, wo Integration auftritt, wo Komplexität verstanden werden kann.

1.5 Parameter zur Kopplung
1.5 Coupling parameters

Die Verbindung / Kopplung zwischen Impuls und Reaktion wird durch die Sensitivität des Systems gesteuert. In vielen auf Risikokonzepten basierenden Ansätzen wird diese Kopplung und damit letztendlich auch die Dimension der Systemreaktion durch die Parameter Vulnerabilität und Resilienz gesteuert.

Aufgrund des Wesens dieser Parameter liegt ein wesentlicher Nachteil dieses Konzepts darin, dass damit in der Regel nur potentiell negative Veränderungen des Systems abbildbar sind, wogegen durchaus mögliche positive Entwicklungen, hin zu einem verbesserten Systemzustand, unberücksichtigt bleiben. Aufgrund des generellen Prinzips der Unsicherheit müssen alle zukünftigen Entwicklungen aber als offen betrachtet werden. Das Konzept der Anpassungsfähigkeit (Adaptability) hingegen ermöglicht die Analyse der Fähigkeit eines Systems, mit Veränderungen umzugehen, unabhängig davon, ob diese aus sich heraus einen positiven oder negativen Impetus darstellen.

1.5.1 Vulnerabilität

Erste Überlegungen zur Bedeutung und Wirkungsweise der Vulnerabilität wurde bereits im 19. Jahrhundert in verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen diskutiert, wie z. B. Geographie (Burton, 1859), Medizin (Samelson, 1866) oder Ingenieurwesen (ohne Autor, 1866). In dieser Frühphase moderner Wissenschaften stand ein physisches, biologisches und technisches Verständnis der Verwundbarkeit im Vordergrund. Seitdem wird der Vulnerabilitätsbegriff unter anderem in der Ökonomie, der Anthropologie und der Psychologie verwendet. In modernen auf Systemgedanken beruhenden wissenschaftlichen Diskursen wurde der Begriff von Chambers (1989) im Zuge von Untersuchungen zur Entwicklung bzw. Unterentwicklung eingeführt und beispielsweise von Bohle (1993) im Kontext von Hungerkatastrophen aufgegriffen und weiter differenziert. In diesem Sinne erklärt Vulnerabilität zum einen, in welchem Umfang ein exponiertes soziales System gegenüber Störungen oder Stress empfänglich ist und zum anderen die eingeschränkten Möglichkeiten, mit diesen Herausforderungen umzugehen bzw. diese zu bewältigen. Im Kontext der Nahrungsmittelsicherheit und Hungerkatastrophen argumentiert Sen (1981), dass Vulnerabilität unabhängig von einer Störung von außen (z. B. durch Fehlernte) im sozialen System intrinsisch existieren kann. Demzufolge ist es der Verlust von Zugangsrechten (entitlements) bzw. der Zusammenbruch des Zugangs zu Nahrungsmitteln, der zu Hungerkatastrophen führen kann, ohne dass tatsächliche Nahrungs-

mittelknappheit vorliegt. Während Bohle et al. (1994) explizit das Entitlement-Konzept im Kontext von Klimawandel und Nahrungsmittelsicherheit aufgreifen, wird Vulnerabilität gegenüber dem Klimawandel als ein Resultat struktureller Gegebenheiten der Politischen Ökonomie, d. h. der Verteilung von wirtschaftlicher und politischer Macht, auch unabhängig von Nahrungsmittelknappheit diskutiert. Strömungen der Critical Theory und der Political Ecology (z. B. Cutter, 1996; Blaikie et al., 1994; Adger und Kelly, 1999) verstehen Vulnerabilität als ein gesellschaftliches Konstrukt und kritisieren, dass bei Risiko-Ansätzen im Zusammenhang mit Naturgefahrenprozessen durch den Fokus auf rein physische Aspekte des Klimawandels diese Dimension vernachlässigt wird.

Bei den naturwissenschaftlichen Zugängen steht die direkte Beziehung zwischen der Magnitude eines naturräumlichen Prozesses und der Vulnerabilität im Vordergrund (z. B. Hollenstein et al., 2002; Thieken et al., 2005, 2007; Dikau und Weichselgartner, 2005; Fuchs, 2009, Papathoma-Köhle et al. 2011). Vulnerabilität kann als die Anfälligkeit einer Person, einer Gesellschaft oder eines Systems hinsichtlich eines spezifischen ungünstigen Prozesses gesehen werden. Dem gegenüber sehen die BefürworterInnen des gesellschaftlich konstruierten Verständnisses von Vulnerabilität diese als eine a priori existierende Realität, die auch unabhängig von Einwirkungen des Klimawandels ein Problem darstellt, das politische, nicht ingenieurtechnologische Lösungen verlangt.

Insgesamt betrachtet bildet das Konzept der Vulnerabilität für das Erkennen, die Analyse und Bewertung von Herausforderungen, die entweder systeminterner Natur sind oder durch externe Systemstörungen entstehen, sowie für die Anpassung im Sinne eines optimalen Umgangs mit diesen einen idealen Ansatz (z. B. Bohle, 2007; Füssel und Klein, 2006). Folgt man sinngemäß den Definitionen von z. B. Wisner et al. (2003) oder Dikau und Weichselgartner (2005), dann kann Vulnerabilität als die Anfälligkeit einer Person, einer Gesellschaft oder eines Systems gegenüber einem spezifischen ungünstigen Prozess gesehen werden.

Im Kontext der Diskussion des Klimawandels und seiner Folgen kann Vulnerabilität als Ausdruck für das Maß der Suszeptibilität / des Aufnahmevermögens von Mensch-Umwelt-Systemen gegenüber negativen Effekten gesehen werden bzw. der fehlenden Fähigkeit, die durch den Klimawandel hervorgerufenen Veränderungen zu bewältigen bzw. in Wert zu setzen (z. B. Adger, 2006; Füssel und Klein, 2006). Nach O'Brien et al. (2004) ist Vulnerabilität dabei nicht nur als ein Resultat fehlender Anpassungskapazitäten, sondern umgekehrt auch als Ausgangspunkt für die Entwicklung von Anpassungskapazitäten zu verstehen (vgl. Box 1.2). Im Sinne des IPCC-Berichts (Intergovernmental Panel on Climate Change) kann Vulnerabilität als das Zusammenwirken von Exposition, Sensitivität und Anpassungsfähigkeit interpretiert werden (Parry et al., 2007).

1.5.2 Resilienz

Auch das Konzept der Resilienz kann auf eine lange Geschichte im wissenschaftlichen Kontext zurückblicken. Wiederum stehen Ingenieurwissenschaft (Young, 1814) und Medizin (Carson, 1820; Scott, 1841) am Anfang. Es ist durchaus interessant, dass in diesem Zusammenhang auch bereits andere, heute durchaus im Kontext der Interaktion von Natur und Gesellschaft diskutierte Begriffe, wie Resistenz (Young, 1814) und Elastizität (Carson, 1820) angesprochen wurden.

Der Begriff der Resilienz wurde von Holling (1973) in die aktuelle wissenschaftliche Diskussion eingebracht, wobei darunter die Fähigkeit von Ökosystemen verstanden wird, Störungen widerstehen zu können, ohne dass das betroffene System seine Struktur verändert bzw. gar zusammenbricht (Gunderson und Holling, 2002; Diamond, 2005).

Bei der Betrachtung sozialer Systeme, auf die das ökologische Prinzip der Resilienz übertragen wurde, steht die Fähigkeit von Individuen oder sozialen Gruppen, externe Stressfaktoren und Störungen infolge ökologischer, sozialer oder auch politischer Einflüsse ausgleichen sowie zukunftsorientiert planen zu können, im Mittelpunkt der Betrachtung (z. B. Watts und Bohle, 2003; Adger, 2000). In jüngerer Zeit wird das Konzept der Resilienz auch auf sozial-ökologische Systeme angewandt (Walker et al., 2004, 2006; Folke, 2006; Bohle, 2007; Berkes et al., 2003).

In vielen wissenschaftlichen Ansätzen wirkt der Vulnerabilität die Resilienz entgegen, welche die Kapazität bzw. Selbsthilfefähigkeit des Individuums, der Gesellschaft oder des Systems zum Ausdruck bringt, diesem ungünstigen Einfluss zu widerstehen bzw. ihn zu überwinden. Ebenso wie Vulnerabilität ist Resilienz dabei dynamisch zu sehen, da beide im Wechselspiel zwischen Treibersystem und Reaktionssystem permanent einem räumlich-zeitlichen Wandel unterliegen (Bohle und Glade, 2008). Turner (2010) weist darauf hin, dass grundlegende Annahmen des Konzepts der Resilienz, die ihren Ursprung in der Beobachtung und Analyse von natürlichen Systemen haben, nur inadäquat auf die komplexen sozialen Strukturen und die reflektierenden AkteurInnen des menschlichen Subsystems übertragen werden können.

Ungeachtet einer mehr naturwissenschaftlichen oder mehr sozialwissenschaftlichen Herkunft und Gewichtung der Begriffe sind Vulnerabilität und Resilienz zentrale Schlüsselbegriffe bzw. steuernde Parameter für Anpassungsfähigkeit. Da-

Box 1.2: Vom Natursystem Erde zum Mensch-Umwelt-System Erde
Box 1.2: From the natural earth system to the human-environmental earth system

Bis zum Auftreten des Menschen vor ca. 160 000 Jahren kann das System Erde als reines Natursystem bezeichnet werden, in dem physikalische, chemische und biologische Prozesse nach rein naturwissenschaftlichen Gesetzmäßigkeiten abgelaufen sind. Sicher ist aber auch, dass der Mensch in seiner Frühphase weitgehend das Verhalten eines Naturwesens zeigte. Erst mit der neolithischen Revolution (vor ca. 10 000 Jahren), die in unterschiedlichen Regionen der Erde zu unterschiedlichen Zeiten eingetreten ist, beginnt ein erster Wandel des reinen Natursystems Erde. Durch den Beginn des systematischen Ackerbaus und die Sesshaftwerdung griff der Mensch als Akteur lokal und regional immer mehr in die Natursysteme ein und bewirkte damit einen ersten Wandel – aus reinen Natursystemen werden zuerst kleinräumig, dann immer stärker ausgeweitet erste Mensch-Umwelt-Systeme. Hierbei ist Umwelt keinesfalls als Synonymbegriff für Natur zur verstehen, sondern steht für beides die Umwelt der Naturraumsphären sowie die vom Menschen geschaffene und beeinflusste Umwelt. In diesem Zeitraum hängen die Aktion des Menschen und die Reaktion der Umwelt meist zeitlich und räumlich nahe zusammen, d. h. der kausale Zusammenhang zwischen Impuls oder Ursache/VerursacherIn und Reaktion ist erkennbar. Da die energetischen Möglichkeiten des Menschen bis in die Neuzeit klar begrenzt blieben, gilt diese prinzipielle Feststellung wohl bis in die zweite Hälfte des 18. Jahrhunderts. In diesem Zeitraum gibt es eine Koexistenz zwischen reinen Natursystemen und Mensch-Umwelt-Systemen.

Mit der industriellen Revolution begann ein neues Zeitalter, von Paul Crutzen und Eugene Stoermer mit dem Begriff Anthropozän bezeichnet. Durch die Erschließung und Inwertsetzung von fossilen Energieträgern verfügt der Mensch über neue Möglichkeiten der Veränderung von Umweltsystemen. Aus dem ursprünglich in lokalen und regionalen Systemmaßstäben wirksamen Menschen ist ein globaler Faktor geworden. Der Mensch beeinflusst, manche mögen sagen, steuert das globale Klima.

Heute finden sich überall die Spuren der global wirksamen Aktivitäten des Menschen, sei es in den physikalischen, chemischen oder biologischen Prozessen oder den dadurch geschaffenen Erscheinungsformen. Demzufolge gibt es keine Natursysteme mehr mit einem unbeeinflussten Energie- oder Stoffhaushalt, es gibt nur noch Mensch-Umwelt-Systeme. Das heißt keinesfalls, dass es nicht Umweltsysteme gibt, in denen Prozesse dominieren, die durch Naturgesetze gesteuert werden; diese werden in diesem Kapitel durch die Natursphären repräsentiert.

bei muss jedoch hervorgehoben werden, dass beide Prinzipien in der Regel nur eine, nämlich die negative Seite möglicher Entwicklungen abdecken und damit für die Betrachtung der Folgeerscheinungen des globalen Klimawandels nur bedingt geeignet sind. Im Hinblick auf die Folgen des Globalen Klimawandels geht es aber auch um die potentiell positiven Entwicklungen, die durch ein Prinzip, das auf die Aufrechterhaltung von Systemzuständen fokussiert ist, nicht abgebildet werden können (Stötter und Coy, 2008). Es mag dabei durchaus erstrebenswert sein, dass Systeme bzw. Systemzustände sich radikal verändern, solange dies zu einer optimierten, nachhaltigen Sicherstellung gesellschaftlicher Interessen und Bedürfnisse beiträgt. In ähnliche Richtung weisen auch Interpretationen von Carpenter et al. (2001) oder Folke (2006), bei denen neben der Robustheit von Systemen auch deren Selbstorganisation bzw. ihre Lern- und Anpassungsfähigkeit thematisiert werden.

1.5.3 Kapazitäten

Ob ein Mensch-Umwelt-System in entsprechender Weise mit Systemstörungen bzw. Stress umgehen kann, hängt von der Anpassungsfähigkeit ab, wobei hierunter nicht die kurzfristige Reaktion im Sinne einer Kapazität zur kurzfristigen Bewältigung (coping capacity) verstanden wird, sondern das mittel- bis langfristige, der zeitlichen Dimension des Nachhaltigkeitsgedankens (siehe unten) entsprechende Umstellen auf einen neuen, mittelfristig stabilen Systemzustand (Smit et al., 2001; Brooks et al., 2005; Gallopín 2006).

Während die Resilienz als Ausdruck für die beharrenden Systemeigenschaften, die mitunter auch verhindern, dass günstige Einflüsse wirksam werden, der Vulnerabilität rein auf der Seite potentiell negativer Entwicklungsoptionen entgegenwirkt, kann die Idee der Kapazität als generell „positives Gegenkonzept" interpretiert werden. In diesem Sinne wird durch den Terminus

Kapazität die „Aufnahmefähigkeit" einer Person, Gesellschaft oder eines Systems verstanden, die es erlaubt einen spezifischen Impuls auch in Richtung eines verbesserten Systemzustands aufzugreifen und weiter zu entwickeln. Dabei geht es um den Aufbau von Kapazität (capacity building), die dann im Sinne einer Anpassungskapazität (adaptive capacity) zu Anpassung an veränderte Rahmenbedingungen beitragen kann.

1.6 Anpassungsfähigkeit
1.6 Adaptability

Trotz aller Anstrengung zur Vermeidung der Verstärkung des Treibhauseffekts wird der Globale Klimawandel im 21. Jahrhundert nicht gestoppt werden, nur sein zeitlicher Gradient kann verändert werden (Meehl et al., 2005). Aus diesem Grund ist Anpassung ein (über)lebenswichtiges Handlungsprinzip, das dazu beiträgt, dass Mensch-Umwelt-Systeme keine drastischen Brüche, wenn nicht sogar einen Kollaps, erleiden (Diamond, 2005). Damit kommt der Anpassung im Umgang mit dem Klimawandel eine zentrale Stellung zu, was auch dadurch zum Ausdruck gebracht wird, dass sowohl in der globalen als auch regionalen Diskussion Anpassung neben Mitigation die zweite zentrale Strategie zur Überwindung des Klimawandels und seiner Folgen ist. Diese Tatsache sowie die diskutierten methodisch-konzeptionellen Überlegungen erklären, dass Anpassungsfähigkeit als Ergebnis des Zusammenwirkens von Vulnerabilität, Resilienz und Kapazität verstanden und deshalb hier, quasi als alle Kopplungen zusammenfassender Parameter, als eigenständiger Punkt auf einer höheren Gliederungsebene betrachtet wird (siehe auch die Darstellung in Abbildung 1.3).

Zum Konzept der Anpassung gehen erste wissenschaftliche Überlegungen auf Diskussionen zur Evolutionsbiologie im 19. Jahrhundert zurück (z. B. Lamarck, 1809; Darwin, 1859). Ursprünglich wurde darunter ein Prozess bzw. eine Fähigkeit verstanden, die es Organismen ermöglicht, sich mit sich ändernden Umweltbedingungen zu arrangieren, beispielsweise durch Standortwechsel oder durch veränderte Lebensreaktionen.

Evolutionäre Anpassung als ein nicht durch bewusstes Handeln charakterisierter Prozess ist übertragbar auf soziale oder organisatorische Anpassung. Anpassung in dieser Form geschieht in jedem Moment und spontan als Reaktion auf äußere Einflüsse. Die Kulturökologie sieht Kultur selbst als primäres Mittel menschlicher Gesellschaften, sich jeweiligen Umweltbedingungen anzupassen (Guillet et al., 1983). Im Klimawandelkontext wird diese Art der Anpassung als autonome Anpassung bezeichnet. Wenn in Band 2 die Folgen des Klimawandels thematisiert werden, dann handelt es sich bei den betrachteten Prozessen und Auswirkungen eindeutig um spontane Anpassung. Dies gilt ohne Zweifel für alle Folgeerscheinungen des Klimawandels in den Natursphären (vgl. Band 2, Kapitel 2–5). Aber auch bei den in Band 2, Kapitel 6 diskutierten gesellschaftlichen Auswirkungen handelt es sich um Beispiele spontaner Anpassung, bei denen der Mensch quasi in seiner Eigenschaft als Naturwesen in das Wirkungsgefüge von Klimawandelimpuls und Reaktion eingebunden ist.

Diese ist klarerweise von allen intendierten Strategien und Handlungen zu unterscheiden, durch welche die Gesellschaft, einzelne Gruppen oder auch Individuen auf die Einflüsse des Klimawandels reagieren bzw. vorausschauend hinsichtlich dieser Wirkungen agieren. Diesem wesentlichen Unterschied wird im AAR14 dadurch Rechnung getragen, dass alle Aspekte bewusster und vorausschauender Anpassung in Band 3 behandelt werden. Diese geplante Form der Anpassung ermöglicht es, zielführend Sackgassen und Negativkonsequenzen des Trial-and-Error Modus der ad hoc-Anpassung (Maladaptation) zu vermeiden. Die Richtung, in die aktive Anpassung zielt, kann durch die normativen Prinzipien der Nachhaltigkeit, aber auch durch weichere, deskriptive Werte zu Überlegungen zum Thema Lebensqualität vorgegeben sein.

Während Vermeidungsstrategien (Mitigation) (vgl. Klein et al., 2007), wie z. B. die bindenden Verpflichtungen gemäß Kyoto-Protokoll (z. B. UNFCCC, 1997), dazu dienen, die Produktion von Treibhausgasen und damit deren Konzentration und Treibhauswirkung zu reduzieren, sind Anpassungsstrategien (Adaptation) das Mittel, um Mensch-Umwelt-Systeme an die regional unterschiedlichen Auswirkungen des Globalen Klimawandels zu adjustieren (Parry et al., 2007). Oft sind Anpassungsstrategien eng mit Vermeidungsstrategien verknüpft und tragen somit zur Vermeidung bei (Tol, 2005; Goklany, 2007; Huq und Grubb, 2007). Um eine differenziertere Betrachtung von Klimawandelmaßnahmen zu ermöglichen, unterscheiden Mahammadzadeh et al. (2013) zwischen reinem Klimaschutz, anpassungsinduziertem Klimaschutz, reiner Anpassung und klimaschutzinduzierter Anpassung. Im AAR14 werden sowohl Vermeidungs- als auch Anpassungsmaßnahmen als Klimaschutzmaßnahmen bezeichnet – es wäre demnach zwischen reinen Vermeidungsstrategien, anpassungsinduzierten Vermeidungsstrategien, reiner Anpassung und klimaschutzinduzierter Anpassung zu unterscheiden. Es gilt grundsätzlich, dass der Anpassungsbedarf umso größer sein wird, je weniger die Maßnahmen des Klimaschutzes greifen.

Dabei sind alle Aktivitäten der Anpassung zielorientiert, entweder in Richtung einer Minderung von Bedrohungen oder einer Inwertsetzung von positiven Entwicklungspotentia-

len. Damit korrespondiert das Prinzip der Anpassung mit den Überlegungen zu einem offenen Risikokonzept im Sinne von good risk und bad risk. Aufgrund des räumlich stark variierenden Charakters des Klimawandels und seiner Folgeprozesse müssen alle Anpassungsmaßnahmen entsprechend den spezifischen Folgeeffekten des Klimawandels individuell gestaltet werden. Gleichzeitig müssen sie auch den Erfordernissen einer nachhaltigen Regionalentwicklung folgen (Adger et al., 2005).

Anpassung umfasst aus heutiger Sicht über die rein biologisch-physikalischen Aspekte hinaus vor allem die gesellschaftliche Seite (z. B. Rappaport, 1971; O'Brien und Holland, 1992; Frommer et al., 2011). Hierbei ist unter anderem an die Entwicklung von neuen Methoden und Strategien zu denken, durch die soziale Gruppen auf Veränderungen in ihrer Umwelt reagieren, um ihre Lebensbedingungen zu verbessern bzw. ihr Überleben zu sichern. In diesem Sinne ist Anpassung als ein systeminterner Prozess in sozialökologischen Systemen zu verstehen, durch den versucht wird, die dynamischen Wechselwirkungen zwischen den biologisch-physikalisch und den soziokulturell geprägten Systemkomponenten in einem dynamischen, entsprechend gesellschaftlichen Werten intendierten Gleichgewicht zu halten (z. B. Folke et al., 2005; Gallopín, 2006). Dabei ist die jeweilige Ausprägung gesellschaftlicher Werte selbst in Abhängigkeit des sozialökologischen Gesamtsystems zu sehen.

Aus dem Wechselspiel zwischen Vulnerabilität und Kapazität lässt sich die Anpassungsfähigkeit eines Mensch-Umwelt-Systems an die von externen Einflüssen gesteuerten Veränderungen (z. B. den Globalen Klimawandel oder Globalisierungseffekte) als auch von internen Faktoren ableiten, die im System selbst ihren Ursprung haben (z. B. demographische Entwicklung, Innovation, Kreativität). Die Anpassungsfähigkeit bringt zum Ausdruck, in welcher Weise das betrachtete System reagiert und welche Entwicklungspfade sich daraus ergeben können. Dabei hängt die Anpassungsfähigkeit von Mensch-Umwelt-Systemen gegenüber den Auswirkungen des Globalen Wandels von folgenden Rahmenbedingungen ab:

- von der Grunddisposition der Vulnerabilität / Kapazität des jeweiligen Mensch-Umwelt-Systems als Konsequenz des Globalen Wandels und gegenüber seinen Teilprozessen;
- von der Intensität (Magnitude und zeitlicher Verlauf) der Teilprozesse des Globalen Wandels (z. B. wie schnell sich eine bestimmte Temperaturerhöhung einstellt);

Die Anpassungsfähigkeit eines Systems wird generell in mittel- bis langfristigen Zeitskalen gedacht (Smit et al., 2001; Brooks et al., 2005; Gallopín, 2006) und besitzt, vergleichbar dem Prinzip der Nachhaltigkeit, eine intergenerationelle Dimension. Während im Kontext eines rein natürlichen Systems Anpassung ein reaktiver Prozess ist, kann im gesellschaftlichen Kontext und damit auch in Mensch-Umwelt-Systemen Anpassung zu einer pro-aktiven, vorausschauenden Handlung werden (Yohe und Tol, 2002; Smit und Wandel, 2006). Gleiches gilt auch für die Anpassungsfähigkeit, die durch intendierte Aktion positiv beeinflusst werden kann.

Anpassungsfähigkeit bringt zum Ausdruck, wie leicht ein System einen Wandel vollziehen kann – ohne wesentliche Verluste seiner Leistungsfähigkeit. Im Parameter der Anpassungsfähigkeit kommt ein komplexes, bei jedem Beispiel aufs Neue zu untersuchendes Zusammenspiel zwischen Vulnerabilität, Resilienz und Kapazität zum Ausdruck. In diesem Sinne geht Anpassungsfähigkeit über die reine Dimension der Resilienz eines Systemzustandes hinaus und ist auch als Schnittstelle zwischen aktuellen und potentiellen zukünftigen Systemzuständen zu verstehen (Abbildung 1.3).

1.7 Kopplung globale Treibersysteme – regionale Reaktionssysteme
1.7 Coupling of global drivers and regional response systems

Das lokale Handeln jeder einzelnen Person wirkt sich in Summe global im Energiehaushalt der Atmosphäre aus. Der damit verbundene globale Klimawandel zeigt auf der regionalen und lokalen Ebene stark differenzierte Ausprägungen und vielfältige Folgeerscheinungen in allen Mensch-Umwelt-Systemen. Dabei gibt es keinen direkten räumlichen Zusammenhang mehr zwischen dem individuellen Ort der Handlung, die den Klimawandel beeinflusst und der globalen Folgen des Klimawandels. Außerdem liegen aufgrund der Trägheit der Subsysteme Impuls und Reaktion oft auch zeitlich sehr lange auseinander.

Anhand eines Beispiels lässt sich dies anschaulich konkretisieren (Abbildung 1.4).

Genauso wenig, wie wir sagen können, ob die Stromquelle, durch die eine Waschmaschine in einem österreichischen Haushalt betrieben wird, aus heimischer Wasserkraft oder aus französischer Atomenergie gespeist wird, oder ob diese Energie vor Jahrmillionen in den Wäldern des Karbon sequestriert wurde oder von momentaner Sonnenaktivität stammt, kann eine Zuordnung zwischen dem energetischen Verhalten der AlpenbewohnerInnen im Jahr 2003 und der um über 4 °C wärmeren Sommertemperatur im gleichen Jahr getroffen wer-

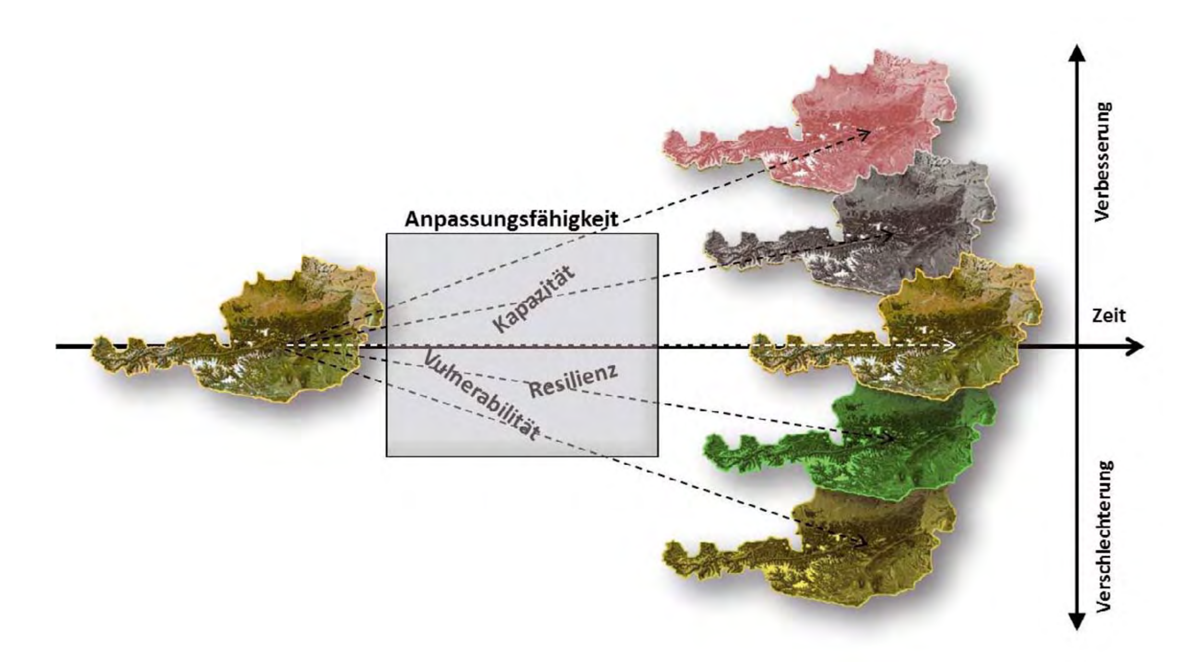


Abbildung 1.3 Offenes Konzept zur Anpassungsfähigkeit, basierend auf einem offenen Risikokonzept. Quelle: Coy und Stötter (2013)
Figure 1.3 Open concept of adaptability, based on open risk concept. Source: Coy und Stötter (2013)

den. Dieser "Jahrhunderttausend-Sommer" hatte nichts mit einer besonders starken Emissionstätigkeit der betroffenen Bevölkerung zu tun und schon gar nicht sind irgendwelche zeitlichen Parallelitäten festzustellen. Handlung und Folgen sind also entkoppelt.

In übertragener Weise gilt das gleiche Prinzip des doppelten Dilemmas auch beim Klimaschutz. Der individuelle Beitrag zum Klimaschutz ist in seiner Wirkung weder räumlich noch zeitlich direkt wahrnehmbar. In Regionen, in denen ein überdurchschnittlicher Beitrag zu Klimaschutzmaßnahmen geleistet wird, wirkt sich dies nicht durch eine regional, im Vergleich zu anderen Regionen reduzierte Erwärmung aus. Summa Summarum ist die heute erfolgte Emissionsminderung auch nicht zeitgleich oder zumindest in absehbarer Zeit erkennbar. Als Konsequenz ergeben sich Problematiken, deren Logiken z. B. die Game Theory und die Rational Choice Theory zu verstehen versuchen. Die Atmosphäre ist ein Gemeinschaftsgut (global common) im Spannungsfeld von individuellen und kollektiven Interessen und Handlungen. Eine entsprechende Beleuchtung von Anpassungs- versus Emissionsminderungsstrategien ist notwendig, um Handlungsoptionen zu entwickeln, effektiv zu kommunizieren und zu implementieren.

Im Zusammenhang mit dem Globalen Klimawandel und seinen Folgeerscheinungen sind die Wechsel zwischen globaler und regionaler/lokaler Dimension sowohl mit einem räumlichen als auch einem zeitlichen Dilemma verbunden. Zum einen sind die Folgen des Klimawandels nicht unbedingt dort am stärksten, wo die Ursachen für die Erwärmung am stärksten sind, zum anderen ist die Erwärmung von heute die Folge des Handelns in der Vergangenheit und das heutige Handeln der Weltgemeinschaft wirkt sich erst in einigen Jahrzehnten voll aus (z. B. Manabe und Stouffer, 1994; Mitchell et al., 2000; Voss und Mikolajewicz, 2001). Der intergenerationelle Charakter dieses Impuls-Reaktion-Systems reicht soweit, dass selbst ein sofortiges Beenden der Emission anthropogener Treibhausgase die Erwärmung im 21. Jahrhundert nicht stoppen kann, sondern nur den zeitlichen Gradienten des Temperaturanstiegs mildert (Meehl et al., 2005).

Bei ihren Überlegungen zum Anthropozän als neuem Abschnitt der Erdgeschichte steht für Crutzen und Stoermer (2000) der Gedanke im Vordergrund, dass der Mensch mit seinem lokal verorteten Handeln global wirksam geworden ist und den Klimawandel auf globaler Ebene beeinflusst bzw. steuert. Am Beispiel des globalen Klimawandels ist dies gut nachvollziehbar: Jede lokale Aktion, bei der fossile Energieressourcen umgesetzt werden, trägt zum anthropogenen Anteil der atmosphärischen Treibhauswirkung bei und schlägt sich somit, quasi aufsummiert, im globalen Erwärmungssignal nieder. Neben diesem Upscaling der Treiberwirkung kommt es auch zu einem regional stark differenzierten Downscaling des globalen Klimasignals auf die größere regionale bzw. lokale Maßstabsebene.

Hinter dieser Aussage verbirgt sich jedoch wiederum das doppelte Dilemma: Zwischen Ursache und Wirkung gibt es weder ei-

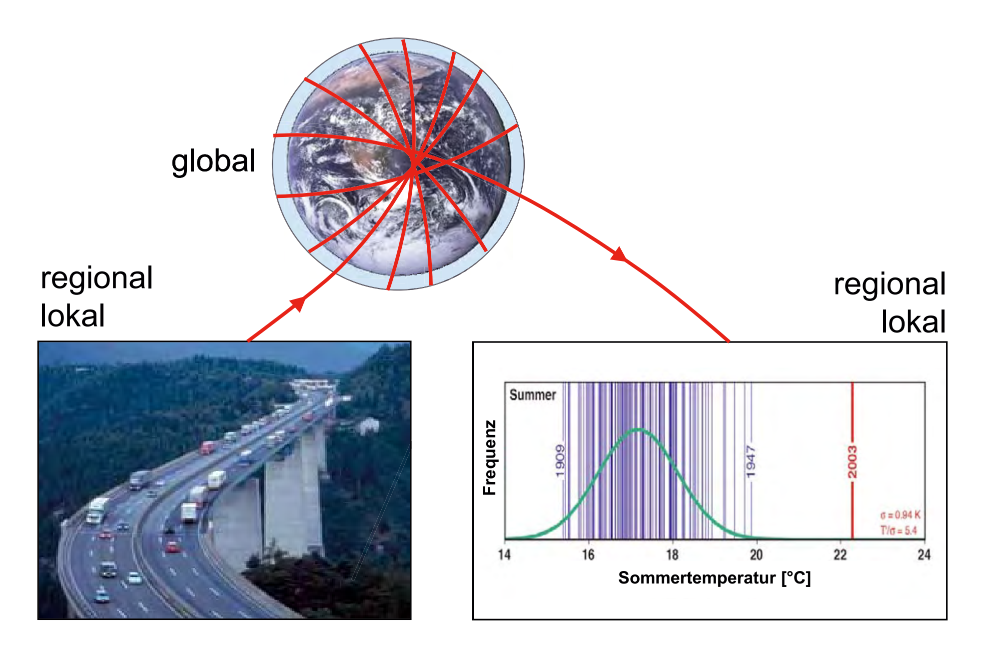


Abbildung 1.4 Doppelte Dilemmata der räumlichen und zeitlichen Entkopplung von Aktion und Reaktion im Globalen Klimawandel. Quelle: nach Schär et al. (2004)

Figure 1.4 Double dilemma of spatially and temporally decoupled action and reaction of global climate change processes. Source: adapted from: Schär et al. (2004)

nen direkten räumlichen noch einen direkten zeitlichen Zusammenhang. Diese Entkoppelung zwischen Aktion und Reaktion ist sicher eine wesentliche Ursache für die immer noch fehlende bzw. stark reduzierte Wahrnehmung des globalen Klimawandels generell und der Akzeptanz nötiger Maßnahmen zum Umgang, sei es Emissionsminderung oder Klimaanpassung.

Des Weiteren führt die räumlich-zeitliche Entkopplung von Ursache und Wirkung direkt zur Frage, wer diese verursacht, wer durch diese geschädigt oder begünstigt wird bzw. zum Problem globaler Verantwortung. Ethische Fragestellungen von Klimagerechtigkeit stehen vor der Herausforderung, direkt die oben diskutiere Entkopplung zu adressieren (Marino und Ribot, 2012). Die gegenüber dem Klimawandel und seinen Folgen am stärksten verwundbaren Gesellschaften sind oftmals nicht mit den HauptverursacherInnen des Klimawandels identisch, wogegen durch Klimawandel induzierte Vorteile größtenteils den VerursacherInnen zufallen.

1.8 Bewertungskonzepte
1.8 Evaluation and monitoring methods

Eine Vielzahl von Werkzeugen zur Analyse und Bewertung von Klimawandeleinflüssen, Vulnerabilität und Risiko sowie zur Feststellung von Kapazitäten, zur Planung, zum Monitoring und zur Evaluation von Maßnahmen werden sowohl in wissenschaftlicher Fachliteratur als auch in der umfangreichen grauen Literatur der Praktiker-Gemeinschaft diskutiert (z. B. CARE, ActionAid oder United Nations Development Programme [UNDP]).

1.8.1 Genereller Überblick

Die Zielsetzung ist immer das Zusammenführen von quantitativen, d. h. den Einfluss des Klimawandels quantifizierenden Daten, mit qualitativen Bewertungen, um dies als Grundlage für die Entwicklung praktisch implementierbarer Maßnahmen verwenden zu können. Das Spektrum solcher Werkzeuge reicht von daten- und rechenintensiven Regionalisierungsmodellen (z. B. PRECIS entwickelt vom Hadley Centre des MET Office in Großbritannien, siehe Jones et al., 2004) bis hin zu rein qualitativen Vulnerabilitätsanalysen, die einen geringen technologischen Aufwand voraussetzen. Nach Hammill und Tanner (2010) lassen sich diese Methoden in Bereitstellung von Daten und Information, Prozessunterstützung sowie Wissensbeteiligung unterteilen.

Aus der Entwicklungszusammenarbeit und dem humanitären Umfeld sind eine Reihe von Werkzeugen hervorgegangen, die letztendlich auf den Methodenkatalog des Participatory Rural Appraisals von Chambers (1994) zurückzuführen sind. Dieser beinhaltet partizipative Methoden für Kartierung, Modellierung, Ortsbegehungen, Matrixbewertung, saisonale Kalender, Trend- und Wandelanalyse, Wohlbefinden und Wohlstandsrangfolgen und -gruppierungen und analytische Diagramme. Fast alle größeren internationalen Organisationen (z. B ActionAid, CARE, Christian Aid, DFID, GIZ, IISD, Internationales Rotes Kreuz, Tearfund, UNDP, UNEP, US-AID, WWF etc.) sowie eine Vielzahl kleinerer Gruppierungen im Bereich der Entwicklungszusammenarbeit haben eigene Werkzeuge zur Implementierung der Klimawandelanpassung in ihrem Tätigkeitsfeld entwickelt.

Auf nationaler und globaler Maßstabsebene sind eine Reihe von Bewertungssystemen entstanden, die es ermöglichen sollen, Volkswirtschaften untereinander entsprechend ihrer sozioökonomischen Entwicklung und mitunter darüber hinaus zu vergleichen. Die verschiedenen Indices wurden als Kritik und Alternativen zum Bruttoinlandsprodukt (BIP) als maßgeblichen Indikator des Erfolgs einer Volkswirtschaft entwickelt. Ein solches Konzept stellt der Human Development Index (HDI) dar. Im Vordergrund der Betrachtung steht dabei das sozioökonomische System, wogegen ökologische Faktoren nur in einzelnen Aspekten des HDI eine untergeordnete Rolle spielen. Der HDI wurde auf der konzeptionellen Grundlage von Amartya Sen durch Mahbub ul Haq (1996) entwickelt, um rein ökonomischen Entwicklungsparametern ein Maß für menschliches Wohlergehen (human well-being) gegenüber zu stellen. Als Einzelkomponenten fließen Daten zur Lebenserwartung, Schulbildung, pro Kopf Einkommen (basierend auf dem BIP), Gesundheit und Lebensstandard in den HDI ein. Weitere Indices sind zum Beispiel der GINI Koeffizient als Maß der Ungleichverteilung von Wohlstand, und der MPI (Multidimensional Poverty Index) als Armutsindikator. Das SEEA (System of Environmental Economic Accounts) berücksichtigt ökologische und ökonomische Faktoren und der HPI (Happy Planet Index) setzt erstmals menschliches Wohlergehen mit ökologischem Fußabdruck in Verbindung. Als einziges Land setzt Bhutan Glück vor wirtschaftliche Produktivität als Ziel seiner Volkswirtschaft an und bewertet dies als Gross National Happiness (GNH).

Da keine direkt ökologischen Parameter in den HDI miteinbezogen werden, ist seine Anwendungsmöglichkeit im Kontext der Klimawandeldebatte begrenzt. Aus der Perspektive von Vulnerabilität als präexistierender Bedingung einer Gesellschaft stellt er aber dennoch ein wichtiges Instrument zur Bewertung von Auswirkungen und Anpassungsoptionen dar. Für die Bewertung der Folgeerscheinungen des Klimawandels im regionalen Betrachtungsmaßstab des AAR14 bietet sich das Konzept der Ökosystemdienstleitungen zur Verknüpfung zwischen den Auswirkung in den Natursphären und der Gesellschaft an.

1.8.2 Ökosystemleistungen

Das Konzept der Ökosystemdienstleistungen bietet explizit Möglichkeiten, ökologische Folgen des Klimawandels im lokalen und regionalen Betrachtungsmaßstab zu bewerten. Aus diesem Grund wird durch Anwendung dieses Konzepts versucht, die Verknüpfung zwischen den primären Folgen des Klimawandels im Natursystem / in den Natursphären und den daraus resultierenden sekundären Folgen für die Gesellschaft zu ermöglichen. Leistungen der Natur, wie fruchtbare Böden, gesunde Luft, Quell- und Grundwasser in Trinkwasserqualität oder Schutz vor Naturgefahren und Freizeitmöglichkeiten in der Natur wurden sehr lange als selbstverständliches Gemeingut angesehen. Erste wissenschaftliche Überlegungen darüber, dass Ökosysteme in vielfältiger Weise zur gesellschaftlichen Wohlfahrt beitragen, wurden bereits Ende der 1970er Jahre diskutiert (Westman, 1977). In den 1990er Jahren gelang es v. a. Daily (1997) und Costanza et al. (1997) das öffentliche Interesse für den Wert von Ökosystemleistungen und die Erhaltung der biologischen Vielfalt zu sensibilisieren. Aber erst das „Millennium Ecosystem Assessment" (MEA), eine großangelegte Studie der Vereinten Nationen über den Zustand, die Entwicklung und Gefährdung der Ökosysteme (Reid et al., 2005), führte zu einer intensiven weltweiten Diskussion darüber, welche fundamentale Bedeutung die Leistungen der Ökosysteme für das menschliche Leben haben. Seit dem MEA wächst nicht nur die wissenschaftliche Literatur zu Ökosystemleistungen exponentiell an (Fisher et al., 2009), sie werden zunehmend auch zu wichtigen Bestandteilen von nationaler, europäischer und globaler Umweltpolitik. So wurde etwa für Österreich kürzlich ein Inventar von Ökosystemleistungen im Bereich Landwirtschaft erstellt (Götzl et al, 2011). Das Konzept der Ökosystemleistungen findet aber auch zunehmend Eingang in ökonomische Marktmechanismen. Die von den UmweltministerInnen der G8+5-Länder 2007 initiierte TEEB-Studie hat sich zum Ziel gesetzt, den ökonomischen Wert der Dienstleistungen von Ökosystemen und Biodiversität fassbar zu machen. Damit soll nicht nur gezeigt werden, dass ökonomische Instrumente ein wirkungsvolles Mittel für die Biodiversitätspolitik, sondern auch für die Klimapolitik sind (TEEB, 2010).

Was sind nun eigentlich Ökosystemleistungen? Der Begriff der Ökosystemleistungen wird in der Literatur unterschiedlich definiert. Das Millenium Ecosystem Assessment (MEA; Alcamo et al., 2003) definiert Ökosystemleistungen als „Güter und Dienstleistungen, die von der Natur erbracht werden und vom Menschen genutzt werden, um sein Wohlergehen zu gewährleisten". Fisher et al. (2009), de Groot et al. (2010), Haines-Young und Potschin (2011) unterscheiden hingegen zwischen den Leistungen und deren Nutzen: Ökosystemleistungen sind demnach kein Nutzen, sondern sie erbringen einen Nutzen (Staub et al., 2011). Heute wird zumindest beim Versuch, das Ökosystemleistungskonzept zu operationalisieren auch nicht mehr zwischen Ökosystemgütern und Ökosystem-Dienstleistungen unterschieden, sondern diese werden zusammenfassend als Ökosystemleistungen bezeichnet. Diese Unterscheidungen mögen spitzfindig klingen, sie sind aber ganz

wesentlich, wenn es um den Einsatz von Ökosystemleistungen als Indikatoren zur Bewertung der Folgeerscheinungen des Klimawandels geht.

Das MEA unterscheidet vier Kategorien von Ökosystemleistungen:

- Versorgungsleistungen (provisioning services): Dies sind Produkte (oder Güter), die direkt aus Ökosystemen entnommen werden, wie Nahrungs- und Futtermittel, Trinkwasser, Holz, Brennstoffe, pflanzliche Arzneistoffe;
- Regulierungsleistungen (regulating services), wie die Regulierung von Klima und Luftqualität, Abschwächung von Extremereignissen (z. B. durch das Wasserrückhaltevermögen von Boden und Vegetation in Einzugsgebieten), biologische Schädlingsbekämpfung;
- Kulturelle Leistungen (cultural services), wie Erholung, Erleben und Bildung in der Natur, spirituelle und ästhetische Werte;
- Unterstützungs- oder Basisleistungen (supporting services): Dies sind sämtliche Leistungen, die notwendig sind, um die übrigen drei Kategorien zu liefern, wie z. B. Photosynthese, Stoffkreisläufe, Bodenbildung.

Gerade die letzte Kategorie wird heute zunehmend in Frage gestellt. Dies hat zwei Gründe: Erstens ergibt sich damit eine unscharfe Trennung zwischen echten Leistungen und den ökologischen Prozessen, die notwendig für die Existenz dieser Leistungen sind (Wallace, 2007; Lamarque et al., 2011), und zweitens ergeben sich damit u.U. auch Doppelzählungen (Staub et al., 2011). So ist z. B. Trinkwasser, das unmittelbar genutzt wird, die finale Ökosystemleistung, die von Zwischenleistungen, wie der Reinigungskraft von Böden und dem Nährstoffhaushalt abhängt. Würde man beide einrechnen, käme es zu einer Doppelzählung. Aus diesen Gründen werden etwa im Inventar der Ökosystemleistungen der Schweiz und im Österreichischen Inventar der Ökosystemleistungen für die Landwirtschaft ausschließlich finale Ökosystemleistungen erfasst. Es sind dies Ökosystemgüter und -dienstleistungen, die vom Menschen direkt genossen, konsumiert oder genutzt werden (Final Ecosystem Goods and Services, FEGS) und so direkt zur Wohlfahrt beitragen (Boyd und Banzhaf, 2007).

Die Unterstützungs- oder Basisleistungen werden in diesen Inventaren zu den Zwischenleistungen gezählt, die dem Menschen keinen direkten Nutzen liefern. Dieser Ansatz zeigt klar auf, dass das Konzept der Ökosystemleistungen einer anthropozentrischen Perspektive entspricht. Es konzentriert sich somit auf jene Aspekte von Ökosystemen, die einen erkennbaren Wohlfahrtsbezug haben, also in irgendeiner Form von Menschen genutzt oder geschätzt werden. Aus diesem Ansatz ergibt sich auch, dass nur diejenigen Leistungen berücksichtigt werden, deren Nutzen nach heutigem Kenntnisstand erkennbar ist.

Damit ist zugleich ein Grundproblem des Konzeptes der Ökosystemleistungen angesprochen: Den Ökosystemen wird kein Wert an sich, sondern nur in ihrer Relevanz für den Menschen zugesprochen. Die konsequente Weiterführung des zugrundeliegenden ethischen Ansatzes, insbesondere wenn Ökosystemleistungen monetarisiert werden, kann zu tiefgreifenden Veränderungen in den Werthaltungen der Gesellschaft führen (Spash, 2008).

Aufbauend auf die Klassifizierung des MEA entwickelte die Europäische Umweltagentur (EEA) ein neues Klassifizierungssystem, das mit den bereits etablierten Konten der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung (VGR) kompatibel ist, um dort in Zukunft auch Ökosystemleistungen zu integrieren (Haines-Young und Potschin, 2011). Die Klassen der Common International Classification of Ecosystem Goods and Services (CICES) der EEA und der MEA sind mit Ausnahme der Unterstützungs- oder Basisleistungen praktisch deckungsgleich. Letztere werden auch im CICES nicht verwendet, um Doppelzählungen zu vermeiden. CICES ist relativ offen formuliert und lässt daher auch bei nationalen Umsetzungen Spielraum für länderspezifische Gegebenheiten zu.

Warum sind Ökosystemleistungen gut geeignet, um Folgeerscheinungen des Klimawandels zu bewerten? Ökosysteme reagieren sensitiv auf Klimaänderungen, auch wenn ihre Reaktion sowohl von der Stärke der Veränderung, als auch von ihrer Resilienz abhängt. Darüber hinaus bietet gerade das Monitoring von Ökosystemleistungen die Möglichkeit, die schwierig zu fassenden indirekten Wirkungen der Klimafolgen zu beachten. Allerdings werden Auswirkungen des Klimawandels auf Ökosysteme teilweise verstärkt durch andere Aspekte des Globalen Wandels, wie etwa eine zunehmende Fragmentierung der Ökosysteme und Landschaften; andererseits können sich auch enorme Zeitverzögerungen in der Reaktion ergeben, z. B. wenn es um Änderungen der Artengarnitur oder gar um Bodenbildungsprozesse geht. Darüber hinaus wird die aktuelle Biodiversitätskrise, die sich in einem rasanten Verlust an biologischer Vielfalt äußert, wegen der engen Beziehung zwischen Biodiversität und Ökosystemleistungen zu einem geringeren Adaptationsvermögen gegenüber dem Klimawandel führen.

1.9 Forschungsbedarf
1.9 Research needs

Innerhalb eines Kapitels, das einen Überblick über wesentliche theoretisch-konzeptionelle Grundlagen zum Inhalt hat, die bei der Betrachtung von Folgeerscheinungen des Klimawandels wichtig sind, muss der Fokus des Forschungsbedarfs konsequenterweise auf einer theoretischen oder methodischen Ebene angesiedelt sein.

Aus einer philosophisch-theoretischen Betrachtung lässt sich der Forschungsbedarf eindeutig auf ein zentrales Thema konzentrieren. Es gibt zwar seit der Antike unterschiedliche theoretische Konzepte zum Verhältnis zwischen Mensch / Gesellschaft / Kultur und Natur / Umwelt. Sie alle beruhen aber auf einem dichotomen Weltbild und sind deshalb im Zeitalter des Anthropozäns, in dem die Erde sich als ein hybrides Mensch-Umwelt-System darstellt, nicht mehr gültig.

Hier ist klarer Bedarf an Überlegungen zu einer Mensch-Umwelt-Theorie des Anthropozäns, die als Grundlage für gesellschaftliche Handlungen im 21. Jahrhundert bestehen kann.

Auf der methodischen Seite gibt es eindeutig Forschungsbedarf an den wesentlichen Schnittstellen:

- Schnittstelle zwischen Natursystem und gesellschaftlichem System

Begleitend zur Theorieentwicklung (siehe Punkt 1) wird eine umsetzbare bzw. anwendbare Methode benötigt, die es erlaubt, den Zusammenhang zwischen Gesellschaft und Umwelt innerhalb von projektbezogenem Arbeiten abzubilden.

- Schnittstelle zwischen Treiber- und Reaktionssystem bzw. zwischen Impuls und Reaktion

Hinsichtlich der Nachvollziehbarkeit / Wahrnehmung der Kopplung von Impuls und Reaktion und der davon abhängigen Akzeptanz von notwendigen Handlungen braucht es methodische Ansätze, die es erlauben die räumlichen und zeitlichen Diskrepanzen zu überwinden.

- Schnittstelle zwischen Maßstabsebenen

Um in einem Mensch-Umwelt-System das komplexe Zusammenwirken zwischen lokaler / regionaler Aktion, daraus resultierenden globalen Treibersignalen und wiederum lokaler / regionaler Reaktion nachvollziehbar besser verstehen zu können, braucht es neue, mehrskalige Modellansätze, in denen v. a. die menschliche Aktion und Reaktion auf lokaler / regionaler Maßstabsebene zeitlich synchron mitgeführt wird.

1.10 Literaturverzeichnis
1.10 References

Adger, W.N., 2000. Social and ecological resilience: are they related? Progress in Human Geography 24, 347–364.

Adger, W.N., 2006. Vulnerability. Global Environmental Change 16, 268–281.

Adger, W.N., Arnell, N.W., Tompkins, E.L., 2005. Adapting to climate change: perspectives across scales. Global Environmental Change 15, 75–76. doi:10.1016/j.gloenvcha.2005.03.001

Adger, W.N., Kelly, P.M., 1999. Social vulnerability to climate change and the architecture of entitlements. Mitigation and adaptation strategies for global change 4, 253–266.

Alcamo, J., Ash, N.J., Butler, C.D., 2003. Ecosystems and human well-being: a framework for assessment. A report of the conceptual framework Working Group of the Millennium Ecosystem Assessment. Island Press, Washington, Covelo, London.

Altwegg, D., 1988. Volkswirtschaftliche Auswirkungen einer Zerstörung alpiner Schutzwälder durch Luftverunreinigungen: Mögliche Bewertungsmethoden und deren Grenzen. P. Haupt, Bern.

Altwegg, D., 1989. Die Folgekosten von Waldschäden – Bewertungsansätze für die volkswirtschaftlichen Auswirkungen bei einer Beeinträchtigung der Schutzfunktion von Gebirgswäldern, Forstwissenschaftliche Beiträge (Professur Forstpolitik und Forstökonomie). ETH, Zürich.

Ammann, W., 2001. Integrales Risikomanagement – der gemeinsame Weg in die Zukunft. Bündnerwald 5, 14–17.

Banse, G., 1996. Herkunft und Anspruch der Risikoforschung, in: Risikoforschung Zwischen Disziplinarität Und Interdisziplinarität. Von Der Illusion Der Sicherheit Zum Umgang Mit Unsicherheit. Edition Sigma, pp. 15–72.

Banse, G., Bechmann, G., 1998. Interdisziplinäre Risikoforschung. Eine Bibliographie. Westdeutscher Verlag GmbH, Opladen / Wiesbaden.

Barney, G.O., 1982. The Global 2000 Report to the President: Entering the Twenty-First Century, Complete ed edition. ed, Council on Enviromental Quality. Penguin Books, Harmondsworth, Middlesex; New York.

Barrows, H.H., 1923. Geography as human ecology. Annals of the Association of American Geographers 13, 1–14.

Beck, U., 1992. Risk society: Towards a new modernity. Sage, London, Thousand Oaks, CA, New Delhi, India.

Becker, E., Jahn, T., 2000. Sozial-ökologische Transformationen. Theoretische und methodische Probleme transdisziplinärer Nachhaltigkeitsforschung, in: Brand, K.W. (Ed.), Nachhaltige Entwicklung Und Transdisziplinarität. Analytica V.-G., pp. 67–84.

Becker, E., Jahn, T., 2006. Soziale Ökologie: Grundzüge einer Wissenschaft von den gesellschaftlichen Naturverhältnissen. Campus Verlag, Frankfurt am Main; New York.

Berg, M., Erdmann, G., Hofmann, M., Jaggy, M., Scheringer, M., Seiler, H., 1994. Was ist ein Schaden? Zur normativen Dimension des Schadensbegriffs in der Risikowissenschaft. vdf Hochschulverlag AG, Zürich.

Berkes, F., Colding, J., Folke, C., 2003. Navigating social-ecological systems: building resilience for complexity and change. Cambridge University Press, Cambridge, New York, Melbourne, Madrid, Cape Town, Singapore, Sao Paulo.

Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I., Wisner, B., 1994. At risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters. Taylor & Francis, London.

Bobek, H., Schmithüsen, J., 1949. Die Landschaft im logischen System der Geographie. Erdkunde 3, 112–120.

Bohle, H.-G., 1993. The geography of vulnerable food systems, in: Bohle, H.G., Downing, J.O., Inbrahim, F.N. (Eds.), Coping with Vulnerability and Criticality. Case Studies on Food-Insecure People and Places., Freiburg Studies in Development Geography. pp. 15–29.

Bohle, H.-G., 2007. Geographies of Violence and Vulnerability an Actor-Oriented Analysis of the Civil War in Sri Lanka (Geographien von Gewalt und Verwundbarketi. Eine akteursorientierte Analyse des Bürgerkrieges auf Sri Lanka). Erdkunde 61, 129–146.

Bohle, H.-G., Downing, T.E., Watts, M.J., 1994. Climate change and social vulnerability: toward a sociology and geography of food insecurity. Global Environmental Change 4, 37–48.

Bohle, H.-G., Glade, T., 2008. Vulnerabilitätskonzepte in Sozial-und Naturwissenschaften, in: Felgentreff, C., Glade, T. (Eds.), Naturrisiken Und Sozialkatastrophen. S. Spektrum Akademischer Verlag, pp. 99–119.

Boyd, J., Banzhaf, S., 2007. What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. Ecological Economics 63, 616–626. doi:10.1016/j.ecolecon.2007.01.002

Brooks, N., Neil Adger, W., Mick Kelly, P., 2005. The determinants of vulnerability and adaptive capacity at the national level and the implications for adaptation. Global Environmental Change 15, 151–163. doi:10.1016/j.gloenvcha.2004.12.006

Bryant, R., Bailey, S., 1997. Third World Political Ecology: An Introduction, 1st Ed. edition. ed. Routledge, London; New York.

Büdel, J., 1969. Das System der klima-genetischen Geomorphologie. Erdkunde 23. doi:10.3112/erdkunde.1969.03.02

Burton, R.F., 1859. The Lake Regions of Central Equatorial Africa, with Notices of the Lunar Mountains and the Sources of the White Nile; being the results of an Expedition undertaken under the patronage of Her Majesty's Government and the Royal Geographical Society of London, in the years 1857–1859. Journal of the Royal Geographical Society of London 29, 1–454.

Campbell, J.Y., Vuolteenaho, T., 2003. Bad beta, good beta (NBER Working Paper No. 9509). National Bureau of Economic Research, Cambridge, Massachusetts.

Carol, H., 1956. Zur Diskussion um Landschaft und Geographie. Kümmerly & Frey, Geogr. Verlag.

Carpenter, S., Walker, B., Anderies, J.M., Abel, N., 2001. From metaphor to measurement: resilience of what to what? Ecosystems 4, 765–781.

Carson, J., 1820. On the elasticity of the lungs. Philosophical Transactions of the Royal Society of London 110, 29–44.

Carson, R., 1962. Silent Spring. Boston, MA: Houghton Mifflin.

Chambers, R., 1989. Editorial Introduction: Vulnerability, Coping and Policy. IDS Bulletin 20, 1–7. doi:10.1111/j.1759-5436.1989.mp20002001.x

Chambers, R., 1994. The origins and practice of participatory rural appraisal. World development 22, 953–969.

Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P., van den Belt, M., 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature 387, 253–260. doi:10.1038/387253a0

Coy, M., Stötter, J., 2013. Die Herausforderungen des Globalen Wandels, in: Borsdorf, A. (Ed.), Forschen im Gebirge: Christoph Stadel zum 75. Geburtstag. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, pp. 73–94.

Crutzen, P.J., Stoermer, E.F., 2000. The „Anthropocene". Global Change Newsletter. The International Geosphere–Biosphere Programme (IGBP): A Study of Global Change of the International Council for Science (ICSU) 41, 17–18.

Cutter, S.L., 1996. Vulnerability to environmental hazards. Progress in Human Geography 20, 529–539. doi:10.1177/030913259602000407

Daily, G.C., 1997. Nature's services: societal dependence on natural ecosystems. Island Press, Washington, DC.

Darwin, C., 1859. On the origin of species. London.

De Chardin, P.T., 1956. La Place de l'Homme dans la Nature: le Groupe Zoologique Humain. Albin Michel.

De Groot, R.S., Alkemade, R., Braat, L., Hein, L., Willemen, L., 2010. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. Ecological Complexity 7, 260–272. doi:10.1016/j.ecocom.2009.10.006

Descartes, R., 1641. Meditationes de Prima Philosophia. Paris.

Diamond, J.M., 2005. Collapse: how societies choose to fail or succeed. Viking, New York.

Dicks, D.R., 1970. Early greek astronomy to Aristotle, Aspects of Greek and Roman life. Cornell University Press, Ithaca, N.Y.

Dikau, R., Weichselgartner, J., 2005. Der unruhige Planet: der Mensch und die Naturgewalten. Primus, Darmstadt.

Ehlers, E., 2005. Mensch-Umwelt-Beziehungen als geographisches Paradigma, in: Schenk, W., Schliephake, K. (Eds.), Allgemeine Anthropogeographie. Klett-Perthes, Gotha; Stuttgart.

Ehlers, E., 2008. Das Anthropozän: die Erde im Zeitalter des Menschen. Wiss. Buchges., Darmstadt.

Fermers, S., Jungermann, H., 1992. Risikoindikatoren (I): Eine Systematisierung und Diskussion von Risikomaßen. Zeitschrift für Umweltpolitik und Umweltrecht 15, 59–84.

Fischer, L., Purves, R.S., Huggel, C., Noetzli, J., Haeberli, W., 2012. On the influence of topographic, geological and cryospheric factors on rock avalanches and rockfalls in high-mountain areas. Natural Hazards and Earth System Sciences 12, 241–254. doi:10.5194/nhess-12-241-2012

Fischer-Kowalski, M., Haberl, H., Hüttler, W., Payer, H., Schandl, H., Winiwarter, V., Zangerl-Weiß, H., Macho, T., Nicolini, M., Sieferle, R.P., 1997. Gesellschaftlicher Stoffwechsel und Kolonisierung von Natur ein Versuch in Sozialer Ökologie. G u. B Verl. Fakultas, Amsterdam.

Fischer-Kowalski, M., Weisz, H., 1999. Society as hybrid between material and symbolic realms: Toward a theoretical framework of society-nature interaction. Advances in Human Ecology 8, 215–252.

Fisher, B., Turner, R.K., Morling, P., 2009. Defining and classifying ecosystem services for decision making. Ecological economics 68, 643–653.

Folke, C., 2006. Resilience: The emergence of a perspective for social–ecological systems analyses. Global Environmental Change 16, 253–267. doi:10.1016/j.gloenvcha.2006.04.002

Folke, C., Hahn, T., Olsson, P., Norberg, J., 2005. Adaptive governance of social-ecological systems. Annu. Rev. Environ. Resour. 30, 441–473.

Frommer, B., Buchholz, F., Böhm, H.R., 2011. Anpassung an den Klimawandel – regional umsetzen! Ansätze zur Climate Adaption Governance unter der Lupe. Raumforsch Raumordn 69, 347–349. doi:10.1007/s13147-011-0109-z

Fuchs, S., 2004. Development of Avalanche Risk in Settlements: Comparative Studies in Davos, Grisons, Switzerland.

Fuchs, S., 2009. Susceptibility versus resilience to mountain hazards in Austria—paradigms of vulnerability revisited. Natural Hazards Earth System Sciences 9, 337–352. doi:10.5194/nhess-9-337-2009

Fuchs, S., Bründl, M., Stötter, J., 2004. Development of avalanche risk between 1950 and 2000 in the Municipality of Davos, Switzerland. Natural Hazards Earth System Sciences 4, 263–275.

Füssel, H.-M., Klein, R.J., 2006. Climate change vulnerability assessments: an evolution of conceptual thinking. Climatic Change 75, 301–329.

Gallopín, G.C., 2002. Epistemological issues in sustainability science, Presentation at: Science and Technology for a Transition Toward Sustainability, a Symposium at the Annual Meeting of the American Association for the Advancement of Science (AAAS).

Gallopín, G.C., 2006. Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. Global Environmental Change, Resilience, Vulnerability, and Adaptation: A Cross-Cutting Theme of the International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change Resilience, Vulnerability, and Adaptation: A Cross-Cutting Theme of the International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change 16, 293–303. doi:10.1016/j.gloenvcha.2006.02.004

Goklany, I.M., 2007. Integrated strategies to reduce vulnerability and advance adaptation, mitigation, and sustainable development. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 12, 755–786.

Götzl, M., Schwaiger, E., Sonderegger, G., Süßenbacher, E., 2011. Ökosystemleistungen und Landwirtschaft – Erstellung eines Inventars für Österreich (Report No. REP-0355). Umweltbundesamt, Wien.

Guillet, D., Godoy, R.A., Guksch, C.E., Kawakita, J., Love, T.F., Matter, M., Orlove, B.S., 1983. Toward a Cultural Ecology of Mountains: The Central Andes and the Himalayas Compared [and Comments and Reply]. Current Anthropology 561–574.

Gunderson, L.H., Holling, C.S. (Eds.), 2002. Panarchy: understanding transformations in human and natural systems. Island Press, Washington, DC.

Haeberli, W., 1990. Permafrost. VAV Mitteilungen 108, 71–88.

Haeberli, W., 1991. Alpengletscher im Treibhaus der Erde. Regio basiliensis: Basler Zeitschrift für Geographie 32, 59–72.

Haines-Young, R.H., Potschin, M., 2011. Common International Classification of Ecosystem Services (CICES): 2011 Update (Paper prepared for discussion at the expert meeting on ecosystem accounts organised by the UNSD, the EEA and the World Bank, London, December 2011 No. EEA/BSS/07/007). European Environment Agency, UK.

Hammill, A., Tanner, T., 2011. Harmonising Climate Risk Management. Adaptation Screening and Assessment Tools for Development Co-operation. OECD Environment Working Papers. doi:10.1787/5kg706918zvl-en

Hollenstein, K., Bieri, O., Stückelberger, J., 2002. Modellierung der Vulnerabilität von Schadenobjekten gegenüber Naturgefahrenprozessen (Vulnerability modeling of objects with regards to natural hazards), in: Veyret, Y., Garry, G. & Meschinet de Richemont, N., Armand Colin (eds) Colloque Arche de La Défense. pp. 22–24.

Holling, C.S., 1973. Resilience and stability of ecological systems. Annual review of ecology and systematics 4, 1–23.

Huq, S., Grubb, M., 2007. Preface. Mitig Adapt Strat Glob Change 12, 645–649. doi:10.1007/s11027-007-9091-8

Hutchinson, G.E., 1970. The Biosphere. Scientific American 223, 45–53.

Hutton, J., 1785. Abstract of a Dissertation read in the Royal Society of Edinburgh, upon the seventh of March, and fourth of April, MDCCLXXXXV, concerning the System of the Earth, its Duration, and Stability.

Jóhannesson, T., 1985. The response time of glaciers in Iceland to changes in climate, in: Annals of Glaciology. Proceedings of the Symposium on Glacier Mapping and Surveying. Presented at the Symposium on Glacier Mapping and Surveying, Reykjavík, Iceland, pp. 100–101.

Jóhannesson, T., Raymond, C., Waddington, E.D., 1989. Time-scale for adjustment of glaciers to changes in mass balance. Journal of Glaciology 35, 355–369.

Jones, R., Hassell, D., Hudson, D., Wilson, S., Jenkins, G., Mitchell, J., 2004. Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS (Workbook). Hadley Centre for Climate Prediction and Research, Met Office, Bracknell, UK.

Jungermann, H., Slovic, P., 1993. Charakteristika individueller Risikowahrnehmung, in: Bayerische Rückversicherung (Ed.), Risiko Ist Ein Konstrukt. München, pp. 89–107.

Kates, R.W., 1962. Hazard and Choice Perception in Flood Plain Management (No. 78). University of Chicago, Department of Geography Research, Chicago.

Kates, R.W., Clark, W.C., Corell, R., Hall, J.M., Jaeger, C.C., Lowe, I., McCarthy, J.J., Schellnhuber, H.J., Bolin, B., Dickson, N.M., Faucheux, S., Gallopin, G.C., Grübler, A., Huntley, B., Jäger, J., Jodha, N.S., Kasperson, R.E., Mabogunje, A., Matson, P., Mooney, H., Moore, B., O–Riordan, T., Svedin, U., 2001. Sustainability. Science 292, 641–642. doi:10.1126/science.1059386

Keiler, M., 2004. Determination of damage potential for Alpine Risk Assessment. Universität Innsbruck, Inst. für Geographie.

Kienholz, H., 2003. Early Warning Systems related to Mountain Hazards, in: Zschau, J., Küppers, A.N. (Eds.), Early Warning Systems for Natural Disaster Reduction. Springer, Berlin, pp. 555–564.

Klein, R.J.., Huq, S., Denton, F., Downing, T.E., Richels, R.G., Robinson, J.B., Toth, F.L., 2007. Inter-relationships between adaptation and mitigation, in: Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikoff, J.P., van der Linden, P.J., Hanson, C.E. (Eds.), Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 745–777.

Kuhlmann, A., 1981. Einführung in die Sicherheitswissenschaft. Vieweg und Sohn, Wiesbaden.

Kunreuther, H., 2001. Strategies for dealing with large-scale and environmental risks, in: Folmer, H., Gabel, L.H., Gerking, S., Rose, A. (Eds.), Frontiers in Environmental Economics. pp. 293–318.

Kunreuther, H., Pauly, M., 2004. Neglecting disaster: why don't people insure against large losses? Journal of Risk and Uncertainty 28, 5–21.

Lamarck, J.-B. de M. de, 1960. [1809] Philosophie zoologique. H. R. Engelmann; Wheldon & Wesley, Weinheim / Bergstr.; Codicote / Herts.

Lamarque, P., Quétier, F., Lavorel, S., 2011. The diversity of the ecosystem services concept and its implications for their assessment and management. Comptes Rendus Biologies 334, 441–449.

Latour, B., 1998. Wir sind nie modern gewesen – Versuch einer symmetrischen Anthropologie, Auflage: 1. ed. Suhrkamp, Frankfurt am Main.

Leiter, A.M., Pruckner, G.J., 2008. Proportionality of Willingness to Pay to Small Changes in Risk: The Impact of Attitudinal Factors in Scope Tests. Environmental and Resource Economics 42, 169–186. doi:10.1007/s10640-008-9214-z

Leser, H., 2005. Diercke-Wörterbuch Allgemeine Geographie, Auflage: 14. Auflage. ed. Deutscher Taschenbuch Verlag, München; Braunschweig.

Luechinger, S., Raschky, P.A., 2009. Valuing flood disasters using the life satisfaction approach. Journal of Public Economics 93, 620–633. doi:10.1016/j.jpubeco.2008.10.003

Mahammadzadeh, M., Chrischilles, E., Biebeler, H., 2013. IW-Analysen 83: Klimaanpassung in Unternehmen und Kommunen: Betroffenheiten, Verletzlichkeiten und Anpassungsbedarf. IW Medien, Köln.

Mahbub ul Haq, A.S., 1996. Reflections on Human Development (OUP Catalogue). Oxford University Press.

Manabe, S., Stouffer, R.J., 1994. Multiple-century response of a coupled ocean-atmosphere model to an increase of atmospheric carbon dioxide. Journal of climate 7, 5–23.

Marino, E., Ribot, J., 2012. Special Issue Introduction: Adding insult to injury: Climate change and the inequities of climate intervention. Global Environmental Change 22, 323–328. doi:10.1016/j.gloenvcha.2012.03.001

Meadows, D.H., Randers, J., Meadows, D.L., Behrens, W.W., 1972. The Limits to Growth. Universe Books.

Meehl, G.A., Covey, C., McAvaney, B., Latif, M., Stouffer, R.J., 2005. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project. Bulletin of the American Meteorological Society 86, 89–93. doi:10.1175/BAMS-86-1-89

Mileti, D.S., Drabek, T.E., Haas, J.E., 1975. Human Systems in Extreme Environments: A Sociological Perspective. Institute of Behavioral Science, University of Colorado.

Mitchell, J.F.B., Johns, T.C., Ingram, W.J., Lowe, J.A., 2000. The effect of stabilising atmospheric carbon dioxide concentrations on global and regional climate change. Geophysical Research Letters 27, 2977–2980. doi:10.1029/1999GL011213

Moore, B., 1920. The scope of ecology. Ecology 1, 3–5.

Müller-Mahn, D., 2007. Perspektiven der geographischen Risikoforschung. Geographische Rundschau 59, 4–11.

Neef, E., n.d. Petermanns Geographische Mitteilungen. 107. Jahrgang, 1963; komplett, gebunden. Gotha: Haack.

Nowotny, H., 1982. Sociological proposals – critical comments., in: Jungermann, H., Winterfeld, D. von, Coppock, R. (Eds.), Analysis, Evaluation and Acceptability of Hazardous Technologies and Their Risks: [Berlin, Dec. 14-16, 1981.] A Workshop Report, Discussion Papers / Internationales Institut Für Umwelt Und Gesellschaft. IIUG, Berlin.

Nye, J.F., 1963. On the theory of the advance and retreat of glaciers. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society 7, 431–456. doi:10.1111/j.1365-246X.1963.tb07087.x

O'Brien, M.J., Eriksen, S., Schjolden, A., Nygaard, L., 2004. What's in a word? Conflicting interpretations of vulnerability in climate change research. (No. 04), CICERO Working Paper 2004. CICERO Senter for klimaforskning, Oslo Norway.

O'Brien, M.J., Holland, T.D., 1992. The role of adaptation in archaeological explanation. American Antiquity 57, 36–59.

Ohne Autor, 1866. The Mechanics of Modern Naval Warfare. The North American review 103.

Papathoma-Köhle, M., Kappes, M., Keiler, M., Glade, T., 2011. Physical vulnerability assessment for alpine hazards: state of the art and future needs. Nat Hazards 58, 645–680. doi:10.1007/s11069-010-9632-4

Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., Co-Authors, 2007. Technical Summary. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Paterson, W.S.B., 1969. The Physics of Glaciers. Pergamon Press.

Patzelt, G., Aellen, M., 1990. Gletscher. VAV Mitteilungen 108, 49–70.

Petak, W.J., Atkisson, A.A., 1982. Natural hazard risk assessment and public policy: anticipating the unexpected. Cambridge Univ Press.

Popper, K.R., 1973. Objektive Erkenntnis. Ein evolutionärer Entwurf. Hoffmann und Campe, Hamburg.

Prettenthaler, F., Albrecher, H., Köberl, J., Kortschak, D., 2012. Risk and Insurability of Storm Damages to Residential Buildings in Austria. The Geneva Papers on Risk and Insurance – Issues and Practice 37, 340–364.

Rappaport, R.A., 1971. Nature, culture and ecological anthropology, in: Man, culture and society. Edited by Harry L. Shapiro. Revised ed. Oxford University Press, London.

Raschky, P.A., Schwindt, M., Schwarze, R., Weck-Hannemann, H., 2008. Risikotransfersysteme für Naturkatastrophen in Deutschland, Österreich und der Schweiz – Ein theoretischer und empirischer Vergleich. Vierteljahrshefte zur Wirtschaftsforschung 77, 53–68.

Raschky, P.A., Weck-Hannemann, H., 2007. Charity hazard – A real hazard to natural disaster insurance? Environmental Hazards 7, 321–329. doi:10.1016/j.envhaz.2007.09.002

Reid, W.V., Mooney, H.A., Cropper, A., Capistrano, D., Carpenter, S.R., Chopra, K., Dasgupta, P., Dietz, T., Duraiappah, A.K., Hassan, R., Kasperson, R., Leemans, R., May, R.M., McMichael, T., Pingali, P., Samper, C., Scholes, R., Watson, R.T., Zakri, A.H., Shidong, Z., Ash, N.J., Bennett, E., Kumar, P., Lee, M.J., Raudsepp-Hearne, C., Simons, H., Thonell, J., Zurek, M.B., 2005. Ecosystems and human well-being: synthesis. Island Press, Washington, DC.

Renn, O., Schweizer, P.-J., Dreyer, M., Klinke, A., 2007. Risiko: über den gesellschaftlichen Umgang mit Unsicherheit. Oekom-Verl., München.

Samelson, A., 1866. Reminiscences of a Four Months' Stay with Professor A. Von Graefe in Berlin. British medical journal 1.

Schär, C., Vidale, P.L., Lüthi, D., Frei, C., Häberli, C., Liniger, M.A., Appenzeller, C., 2004. The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. Nature 427, 332–336. doi:10.1038/nature02300

Schneider, S.H., Semenov, S., Patwardhan, A., Burton, I., Magadza, C.H.D., Oppenheimer, M., Pittock, A.B., Rahman, A., Smith, J.., Suarez, A., Yamin, F., 2007. Assessing key vulnerabilities and the risk from climate change, in: Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikoff, J.P., van der Linden, P.J., Hanson, C.E. (Eds.), Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 779–810.

Schumacher, E.F., 1973. Small is Beautiful: A Study of Economics as if People Mattered Blond and Briggs. London.

Schwab, G., 1958. Der Tanz mit dem Teufel: ein abenteuerliches Interview. A. Sponholtz, Hannover.

Scott, R.W., 1841. Introductory Lecture on the Practice of Medicine. Prov Med Surg J (1840) 3, 83–86.

Sen, A., 1990. Poverty and Famines: An Essay on Entitlement and Deprivation. Oxford University Press, USA, Oxford; New York.

Singh, S.J., Haberl, H., Chertow, M., Mirtl, M., Schmid, M. (Eds.), 2013. Long term socio-ecological research studies in society-nature interactions across spatial and temporal scales. Springer, Dordrecht; New York.

Sintubin, M., 2008. 4.5 Billion Years of Global Change, in: Raymaekers, B. (Ed.), Lectures for the XXIst Century. Leuven University Press.

Smit, B., Pilifosova, O., Burton, I., Challenger, B., Huq, S., Klein, R.J.., Yohe, G., Adger, N., Downing, T., Harvey, E., Kane, S., Parry, M., Skinner, M., Smith, J., Wandel, J., 2001. Adaptation to Climate Change in the Context of Sustainable Development and Equity, in: McCarthy, J.J., Canziani, O.F., Leary, N.A., Dokken, D.J., White, K.S. (Eds.), Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability: Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK ; New York.

Smit, B., Wandel, J., 2006. Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. Global Environmental Change, Resilience, Vulnerability, and Adaptation: A Cross-Cutting Theme of the International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change Resilience, Vulnerability, and Adaptation: A Cross-Cutting Theme of the International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change 16, 282–292. doi:10.1016/j.gloenvcha.2006.03.008

Spash, C.L., 2008. Ecosystem Services Valuation, in: Socio-Economics and the Environment in Discussion CSIRO Working Paper Series. CSIRO Sustainable Ecosystems, Canberra.

Staub, C., Ott, W., Heusi, F., Klingler, G., Jenny, A., Häcki, M., Hauser, A., 2011. Indikatoren für Ökosystemleistungen. Systematik, Methodik und Umsetzungsempfehlungen für eine wohlfahrtsbezogene Umweltberichterstattung, Umwelt-Wissen: Wirtschaft. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern.

Stötter, J., 1994. Veränderungen der Kryosphäre in Vergangenheit und Zukunft sowie Folgeerscheinungen – Untersuchungen in ausgewählten Hochgebirgsräumen im Vinschgau (Südtirol). (Unveröffentlichte Habilitationsschrift). Fakultät für Geowissenschaften der Ludwig-Maximilians-Universität München, München.

Stötter, J., Coy, M., 2008. Forschungsschwerpunkt, Globaler Wandel-regionale Nachhaltigkeit, Innsbrucker Jahresbericht 2003–2007. Innsbrucker Geographische Gesellschaft, Innsbruck.

Stötter, J., Meißl, G., Rinderer, M., Keiler, M., Fuchs, S., 2002. Galtür – Eine Gemeinde im Zeichen des Lawinenereignisses von 1999, in: Steinicke, E. (Ed.), Geographischer Exkursionsführer. Europaregion Tirol – Südtirol – Trentino, Spezialexkursionen Im Bundesland Tirol (Innsbrucker Geographische Studien 33/2). Innsbruck, pp. 167–184.

Suess, E., 1875. Die Entstehung der Alpen. W. Braumüller, Wien.

TEEB, 2010. The economics of ecosystems and biodiversity: mainstreaming the economics of nature: a synthesis of the approach, conclusions and recommendations of TEEB. UNEP.

Thieken, A.H., Kreibich, H., Müller, M., Merz, B., 2007. Coping with floods: preparedness, response and recovery of flood-affected residents in Germany in 2002. Hydrological Sciences Journal 52, 1016–1037.

Thieken, A.H., Müller, M., Kreibich, H., Merz, B., 2005. Flood damage and influencing factors: New insights from the August 2002 flood in Germany. Water resources research 41.

Thieken, A.H., Petrow, T., Kreibich, H., Merz, B., 2006. Insurability and mitigation of flood losses in private households in Germany. Risk Analysis 26, 383–395.

Töglhofer, C., Mestel, R., Prettenthaler, F., 2012. Weather Value at Risk: On the Measurement of Noncatastrophic Weather Risk. Wea. Climate Soc. 4, 190–199. doi:10.1175/WCAS-D-11-00062.1

Tol, R.S.J., 2005. Adaptation and mitigation: trade-offs in substance and methods. Environmental Science & Policy 8, 572–578.

Turner, B.L., 2010. Vulnerability and resilience: coalescing or paralleling approaches for sustainability science? Global Environmental Change 20, 570–576.

Uhlig, H., 1971. Organization and system of geography. Geoforum 2, 7–38. doi:10.1016/0016-7185(71)90159-X

UNEP, 2007. Global Environment Outlook 4: environment for development. United Nations Environment Programme; Stationery Office [distributor], Nairobi, Kenya: London.

UNFCCC, 1997. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change (Protocol No. UN Doc FCCC/CP/1997/7/Add.1, Dec. 10, 1997; 37 ILM 22 (1998)).

Vaughan, E., Nordenstam, B., 1991. The perception of environmental risks among ethnically diverse groups. Journal of Cross-Cultural Psychology 22, 29–60.

Vayda, A.P., McCay, B.J., 1975. New directions in ecology and ecological anthropology. Annual Review of Anthropology 4, 293–306.

Veulliet, E., Stötter, J., Weck-Hannemann, H. (Eds.), 2009. Sustainable Natural Hazard Management in Alpine Environments. Springer, Heidelberg, Dordrecht, London, New York.

Voss, R., Mikolajewicz, U., 2001. Long-term climate changes due to increased CO2 concentration in the coupled atmosphere-ocean general circulation model ECHAM3/LSG. Climate Dynamics 17, 45–60.

Walker, B., Holling, C.S., Carpenter, S.R., Kinzig, A., 2004. Resilience, adaptability and transformability in social–ecological systems. Ecology and Society 9.

Walker, B.H., Anderies, J.M., Kinzig, A.P., Ryan, P., 2006. Exploring Resilience in Social-Ecological Systems Through Comparative Studies and Theory Development: Introduction to the Special Issue. Ecology and Society 11.

Wallace, K.J., 2007. Classification of ecosystem services: Problems and solutions. Biological Conservation 139, 235–246. doi:10.1016/j.biocon.2007.07.015

Wardenga, U., Weichhart, P., 2006. Sozialökologische Interaktionsmodelle und Systemtheorien – Ansätze einer theoretischen Begründung integrativer Projekte in der Geographie? (No. 148. Jahrgang), Mitteilungen der Österreichischen Geographischen Gesellschaft – Auf dem Weg zur „Dritten Säule“. Österreichische Geographische Gesellschaft, Wien.

Watts, M., Bohle, H.-G., 2003. Verwundbarkeit, Sicherheit und Globalisierung, in: Gebhardt, H., Reuber, P., Wolkersdorfer, G. (Eds.), Kulturgeographie: Aktuelle Ansätze Und Entwicklungen. Spektrum Akademischer Verlag, pp. 67–82.

WBGU, 1996. Welt im Wandel – Herausforderung für die deutsche Wissenschaft (Jahresgutachten 1996). Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltänderungen, Bremerhaven, Deutschland.

WBGU, 2007. Welt im Wandel – Sicherheitsrisiko Klimawandel (Hauptgutachten 2007). Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltänderungen, Bremerhaven, Deutschland.

Weichhart, P., 1995. Humanökologie und Geographie. Österreich in Geschichte und Literatur mit Geographie 39, 39–55.

Weichhart, P., 2003. Physische Geographie und Humangeographie – eine schwierige Beziehung: Skeptische Anmerkungen zu einer Grundfrage der Geographie und zum Münchner Projekt einer „Integrativen Umweltwissenschaft", in: Heinritz, G. (Ed.), Integrative Ansätze in der Geographie-Vorbild oder Trugbild? Münchner Symposium zur Zukunft der Geographie, 28. April 2003. Eine Dokumentation. Presented at the Münchner Symposium zur Zukunft der Geographie, L.I.S. Verlag, München.

Weichhart, P., 2005. Auf der Suche nach der „Dritten Säule". Gibt es Wege von der Rhetorik zur Pragmatik, in: Müller-Mahn, D., Wardenga, U. (Eds.), Möglichkeiten und Grenzen Integrativer Forschungsansätze in Physischer Geographie und Humangeographie. Presented at the Forum ifl, Selbstverlag Leibniz-Institut für Länderkunde e.V., Leibniz, pp. 109–136.

Westman, W.E., 1977. How Much Are Nature's Services Worth? Science 197, 960–964. doi:10.1126/science.197.4307.960

White, G.F., 1964. Choice of adjustments to floods (Research Paper No. 93). Department of Geography Research, University of Chicago, Chicago.

Wilhelm, C., 1997. Wirtschaftlichkeit im Lawinenschutz. Methodik und Erhebungen zur Beurteilung von Schutzmaßnahmen mittels quantitativer Risikoanalyse und ökonomischer Bewertung, Mitteilungen / Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung. Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung, 1997, Davos.

Wilhelm, C., 1999. Kosten-Wirksamkeit von Lawinenschutzmassnahmen an Verkehrsachsen. Wald und Landschaft. Praxishilfe.

Wisner, B., Blaikie, P.M., Cannon, T., 2003. At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters, Auflage: Revised. ed. Routledge Chapman & Hall, London; New York.

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (Germany), 2008. Welt im Wandel Sicherheitsrisiko Klimawandel. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.

Woodfork, L., De Mulder, E., 2011. International Year of the Planet Earth (Final Report).

Yohe, G., Tol, R.S.J., 2002. Indicators for social and economic coping capacity—moving toward a working definition of adaptive capacity. Global Environmental Change 12, 25–40. doi:10.1016/S0959-3780(01)00026-7

Young, G.L., 1974. Human Ecology as an Interdisciplinary Concept: A Critical Inquiry, in: A. MacFadyen (Ed.), Advances in Ecological Research. Academic Press, pp. 1–105.

Young, T., 1814. Remarks on the Employment of Oblique Riders, and on Other Alterations in the Construction of Ships. Being the Substance of a Report Presented to the Board of Admiralty, with Additional Demonstrations and Illustrations. Philosophical Transactions of the Royal Society of London 104, 303–336.

Zalasiewicz, J., Williams, M., Haywood, A., Ellis, M., 2011. The Anthropocene: a new epoch of geological time? Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 369, 835–841.

Zierhofer, W., 2002. Gesellschaft: Transformation eines Problems, Wahrmehmungsgeographische Studien. BIS Verlag, Oldenburg.

Band 2 Kapitel 2: Der Einfluss des Klimawandels auf die Hydrosphäre
Volume 2 Chapter 2: Climate Change Impact on the Hydrosphere

Koordinierender Leitautor
Hans-Peter Nachtnebel

Leitautoren
Martin Dokulil, Michael Kuhn, Willibald Loiskandl, Rudolf Sailer, Wolfgang Schöner

Beiträge von
Günter Blöschl, Florian Hanzer, Matthew Herrnegger, Gerhard Kammerer, Georg Kaser, Andreas Kellerer-Pirklbauer, Karl Krainer, Aditya Lukas, Thomas Marke, Ben Marzeion, Ralf Merz, Juraj Parajka, José Luis Salinas, Tobias Senoner, Johann Stötter, Ulrich Strasser, Alberto Viglione

Für den Begutachtungsprozess
Dieter Gerten

Inhalt

ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Kapitel werden die Veränderungen in den Komponenten der Hydrosphäre, zuerst für den Zeitraum von 1950 bis ca. 2010 und dann von 2000 bis zum Ende des 21. Jahrhunderts, analysiert. Es werden Messreihen der Schneehöhen, der Gletschervolumina, des Abflusses, der Wassertemperaturen und von Grundwasserständen ausgewertet, während für den zukünftigen Zeitabschnitt Simulationen von regionalen Klimamodellen herangezogen werden. Insbesondere werden die Ergebnisse des CLM-ECHAM5-A1B-Modells, des REMO-UBA-Modells (A2, A1B, B1) sowie die A1B-Simulationen des ARPEGE-ALADIN und Reg-CM3 aus dem ENSEMBLES-Projekt verwendet. Ergänzend werden dann noch Szenarien (RCP2.6 und RCP8.5) des 5. IPCC-Sachstandsberichts bezüglich der zukünftigen Entwicklung der Gletscher ausgewertet.

Die Daten belegen einen Anstieg der Schneefallgrenze in Österreich seit 1980, wobei dieser im Sommer deutlich ausgeprägt ist. Diese Entwicklung deckt sich mit der im Vergleich zum Winter stärkeren Zunahme der Lufttemperatur im Sommer. Im hochalpinen Bereich (Sonnblick) ist seit den 1940er und 1950er Jahren eine Abnahme der Extremschneehöhen und der Jahr-zu-Jahr Schwankungen der Schneehöhen festzustellen, die sich gut durch Veränderungen des Niederschlags erklären lassen. In den letzten Jahrzehnten haben sämtliche Gletscher Österreichs in ihrer Fläche und im Volumen deutlich abgenommen. So hat der Hintereisferner vom Herbst 1964 bis 2007 21 m Wasseräquivalent verloren, was einer gemittelten Eisdicke von ca. 23 m entspricht.

Die Trends in den jährlichen Abflusshöhen sind im Zeitraum 1950–2007 nur schwach und statistisch nur in einigen Einzugsgebieten signifikant ausgeprägt. In der regionalen Ausprägung bildet der Alpenhauptkamm eine klare Grenze. Im Alpenraum dominiert ein steigender Trend, während im Süden eine klar fallende Tendenz besteht. Auch im saisonalen Abflussverhalten zeigen sich unterschiedliche Trends. Während nördlich der Alpen der Winterabfluss steigt, zeigt sich im Süden ein gegenteiliges Verhalten. Hochwässer haben seit 1976 in etwa 20 % der Einzugsgebiete zugenommen, besonders in kleinen Gebieten nördlich des Alpenhauptkammes.

Ein Vergleich der Oberflächenwassertemperaturen in den Seen zwischen den Langzeitmittelwerten von 1960 bis 1989 und den Mittelwerten von 2001 bis 2005 zeigt eine statistisch signifikante Zunahme. Im Einzugsgebiet der Traun beträgt der Anstieg 0,9 °C, im Agergebiet 1,7 °C und in den Kärntner Seen 1,3 °C.

Die Wasserbilanz Österreichs weist für die Referenzperiode 1961 bis 1990 einen mittleren Jahresniederschlag von 1 140–1 170 mm / Jahr, eine Verdunstung von 510–520 mm / Jahr und einen Abfluss von 630–650 mm / Jahr aus. Der Wasserverbrauch der Industrie beträgt derzeit 20 mm / Jahr, die häusliche Nutzung beansprucht 8 mm / Jahr, und der Bewässerungsbedarf der Landwirtschaft wird mit 2 mm / Jahr ausgewiesen. Die Nutzungsanteile sind klein im Vergleich zum Dargebot.

Österreich deckt derzeit seinen Strombedarf zu etwa 60 % aus Wasserkraft. Speicher leisten einen Beitrag zur Deckung des Spitzenbedarfs und zum Ausgleich des saisonalen Abflussverhaltens.

Die Simulationen zukünftiger klimatischer Verhältnisse lassen nur geringe Veränderungen des Jahresniederschlags erwarten. Generell ist anzunehmen, dass die Alpen eine Trennlinie bilden und südlich davon die Niederschläge weiterhin tendenziell abnehmen werden. Die Temperaturen werden steigen, im Sommer stärker als im Winter.

Dadurch bedingt wird die Dauer der Schneebedeckung insbesondere zwischen 1 000–2 000 m zurückgehen. Die Dauer der heutigen Schneebedeckung (2010) wird bis zur Mitte des Jahrhunderts erst in Lagen auftreten, die etwa um 200 Höhenmeter bergwärts verschoben sind. Selbst bei gleichbleibender Temperatur werden die Gletscher weiterhin abnehmen, ehe sie einen neuen Gleichgewichtszustand erreichen. Bei etlichen Gletschern könnte der maximale Schmelzbeitrag bereits erreicht sein. Bis Ende des Jahrhunderts werden nur mehr kleinere Gletscheranteile vorhanden sein. Insgesamt hat der Gletscherabfluss nur geringen Einfluss auf die Wasserbilanz Österreichs, aber regionale Auswirkungen sind in hoch-alpinen Lagen zu erwarten.

Im Abfluss ist bei den Fließgewässern eine Verschiebung in der saisonalen Charakteristik sehr wahrscheinlich. Die Winterniederwässer im Alpenraum werden wegen der erhöhten Wintertemperatur und der früher eintretenden Schneeschmelze tendenziell höhere Abflusswerte zeigen. In Höhenlagen unter 900 m werden die Sommerniederwässer geringere Abflüsse aufweisen und länger andauern. Generell werden die Sommerabflüsse leicht fallende Tendenz aufweisen, die im Süden deutlich ausgeprägt ist. Bis Mitte dieses Jahrhunderts ist ein Rückgang des Abflusses im Jahresmittel von 3–6 % zu erwarten.

Bezüglich der Hochwässer ist keine klare Aussage möglich. Im Norden Österreichs (Mühl- und Waldviertel) könnten Winterhochwässer verstärkt auftreten.

Bezüglich der Wassertemperatur wird bis zur Mitte des Jahrhunderts eine durchschnittliche Zunahme zwischen 1,2–2,1 °C in den Kärntner Seen und 2,2–2,6 °C für die meisten Salzkammergutseen angegeben. Bei den Fließgewässern wird bis 2050 ein Anstieg zwischen 0,7–1,1 °C im Sommer und 0,4–0,5 °C im Winter erwartet. Bis 2050 wird die mittlere

Wassertemperatur der Donau bei Hainburg von einem aktuellen Wert von ca. 10,5 °C auf Werte zwischen 11,1 und 12,2 °C steigen.

Die Grundwasserneubildung wird bis Mitte des Jahrhunderts nur geringe Änderungen zeigen, doch dürfte sie langfristig in den meisten Regionen leicht rückläufig sein. Für kleine Wasserversorgungseinrichtungen mit ungünstigen Rahmenbedingungen kann in einigen Regionen, insbesondere in niederschlagsärmeren Gebieten, eine Beeinträchtigung der Versorgungssicherheit auftreten. Für Anlagen im alpinen Raum, sowie bei ufernahen Grundwasserentnahmen, ist keine quantitative Beeinträchtigung zu erwarten. Bisher konnten keine Signale für vermehrte Starkregenereignisse gefunden werden, die erhöhte Trübungen verursachen könnten.

Infolge erhöhter Temperaturen steigt der Wasserbedarf der Pflanzen, sodass im Osten und Südosten der Beregnungsbedarf längerfristig zunehmen wird. Da die Bewässerungsmengen überwiegend durch Grundwasserentnahmen abgedeckt werden, ist der zusätzliche Bedarf für die regionale Wasserbilanz durchaus von Bedeutung. In den niederschlagsarmen Anbauregionen Österreichs werden Sommerkulturen zunehmendem Hitze- und Trockenstress ausgesetzt sein.

Die hydrologischen Veränderungen haben einen leichten Rückgang der Wasserkrafterzeugung zur Folge, wobei die Produktion im Sommer ab- und im Winter zunehmen wird. Die vorliegenden Prognosen zeigen je nach verwendetem Klimamodell Unterschiede in der Jahreserzeugung, die bis Ende dieses Jahrhunderts zwischen +5 % und etwa –15 % liegen werden. Bezüglich des Kühlwasserbedarfs sind regional und saisonal Einschränkungen möglich, wie z. B. im Sommer im Voralpenbereich. Anlagen an den größeren Flüssen (Drau, Inn, Mur, Donau) sollten keinen wasserwirtschaftlichen Einschränkungen unterliegen.

SUMMARY

In this chapter, the quantitative changes of the components of the hydrosphere are analyzed for the period from 1950 to 2010 and then for the period from 2000 until the end of this century. For the first period, the observed changes are described by analyzing the time series of snow depth, glacier volumes, surface runoff, water temperatures and groundwater tables. For the future period from 2010 to 2100, regional climate models are applied in order to provide the input to various hydrological models. In particular, results were selected from the CLM-ECHAM5-A1B and REMO-UBA models, with SRES emission scenarios A2, A1B and B1, as well as the A1B simulation from the ARPEGE-ALADIN and Reg-CM3 from the ENSEMBLES project. Additionally, two scenarios from the 5th IPCC-Assessment Report (RCP2.6 und RCP8.5) were analysed with respect to the impacts on glaciers.

The data show that in Austria, since 1980 the snow line has shifted upwards, predominantly in the summer season. This is consistent with a stronger increase of the air temperature in the summer compared to the winter. Since the 1940s and 1950s, in the high alpine range (Sonnblick), a decrease in extreme snow depths has been detected since the middle of the last century, together with a reduced variability of annual snow depths. This effect can be explained by precipitation changes. The retreat of glaciers (a decrease in both the area and the volume) has been documented over the last decades. For example, between 1964 and 2007, the Hintereisferner in Tirol has lost on average about 23 m in ice thickness, which is equivalent to about 21 m of water.

For the period 1950–2007 the observed changes in mean annual runoff are rather small and mostly statistically insignificant. In some alpine catchments there is an increasing trend in runoff while in the south, a small negative trend was observed which was statistically significant in some basins. The alpine range constitutes also clear border with respect to changes in seasonal runoff. While north of the Alps the winter runoff (November to April) has increased, the opposite trend is found in the south. With respect to floods there is an increasing trend in about 20 % of the catchments since 1976, especially in smaller catchments north of the Alps.

Based on a comparison between the long-term mean values of lake surface water temperature from 1960 to 1989 and from 2001 to 2005, there is a statistically significant increase in measured temperature. For instance, the surface water temperature increased approximately 0.9 °C in the Traun catchment; by 1.7 °C in the Ager basin; and by approximately 1.3 °C in the Carinthian lakes.

For the reference period 1961 to 1990, the water balance for Austria yielded a mean annual precipitation of 1140–1170 mm / year, an evapotranspiration rate of 510–520 mm / year and a mean annual runoff of 630–650 mm / year. In comparison to these figures, the total water consumption is small. Austrian industry consumes 20 mm / year, while domestic water requirements are about 8 mm / year and the irrigation demand amounts to 2 mm / year.

Austria covers approximately 60 % of its electric energy demand by hydropower. Numerous high alpine storage schemes buffer seasonal runoff patterns and assist in balancing energy demand and generation.

Climate change models and simulations indicate only small changes in precipitation over Central Europe. The Alps are

considered as a dividing range between an area of increasing precipitation in the north and a decreasing area in the south. Air temperature increase in all models, and are more pronounced in summer than in winter.

As a consequence, the number of days with permanent snow cover will decrease especially in regions lying at elevations between 1000 to 2000 m and it is estimated that the current snow cover (2010) will be shifted by about 200 m towards higher altitudes by the middle of the century.

Even without any further increase in temperature glaciers will continue to shrink before they reach a new equilibrium. In several glacier catchments, the peak contribution to runoff caused by melting may already have been reached. Thus, by the end of this century, only small glaciated areas will exist. Overall, glacial runoff is essential for high alpine catchments however contribution to the water balance for Austria is quite small.

Due to the Alpine environment, there is a pronounced seasonality in runoff patterns. Considering the expected higher temperatures, the seasonal patterns will shift. Due to warmer winter temperatures, and an earlier start of the snow melt period, the winter low flows will be augmented. The summer low flows are expected to decrease in low land catchments, particularly in southern regions. By 2050, mean annual runoff may decrease by 3–6 %.

With respect to floods, no clear climate response could be identified, except for winter floods which are more likely to occur in the northern parts of Austria (Wald- und Mühlviertel).

With respect to water temperatures, it is expected that, by 2050, mean lake water temperatures in the Carinthian lakes will increase between 1.2 to 2.1 °C and by 2.2 to 2.6 °C for most of the lakes in Salzkammergut. By 2050, river water temperatures will increase between 0.7 to 1.1 °C in summer and by 0.4 to 0.5 °C in winter. Simulations to 2050 for the Danube show a mean annual water temperature range of 11.1 to 12.2 °C, compared to 10.5 °C today.

Minor changes are expected in groundwater recharge until 2050, however, in the long term a small decreasing trend may be found in most regions. Considering the spatial heterogeneity of available water resources, some adverse impacts for small water suppliers may occur, especially in regions with low precipitation. Water supply from springs in alpine regions or from bank filtered groundwater will not face any water stress. So far, there is no evidence for more frequent heavy rainfall events which could create turbidity problems.

Due to increasing temperatures, especially during the vegetation period, it is expected that increasing agricultural water demand will occur, especially in eastern and in southeastern Austria. Since irrigation water stems mainly from groundwater, the increased water demands will have effects on the regional water balance. In the precipitation limited agricultural regions of Austria, crops will be subjected to additional heat and drought stress.

The hydrological changes will result in an overall decrease of annual hydropower production, with a decrease in summer and an increase in winter production. Depending on the selected forcing regional climate model, the annual changes in power generation range between +5 % and –15 % in 2100. Cooling water demands may be restricted in the summer periods in some pre-alpine catchments, while the major facilities along the Drau, Inn, Mur and Danube should be able to cover their demand.

KERNAUSSAGEN

- Wasservorkommen

Österreich ist als wasserreiches Land zu bezeichnen und nutzt nur einen kleinen Teil des Wasserdargebots. Regional bestehen große Unterschiede im Wasserdargebot, das generell ein West-Ost-Gefälle aufweist, wobei der Osten als niederschlagsarm einzustufen ist. Mittelfristig (Mitte des Jahrhunderts) sind nur geringe Veränderungen im Abfluss zu erwarten (mittleres Vertrauen). Langfristig (Ende des Jahrhunderts) wird der Abfluss in vielen Gebieten Österreichs leicht abnehmen (hohes Vertrauen), wobei der Süden stärker betroffen sein dürfte.

- Extremereignisse

In der Periode 1976–2007 haben in etwa 20 % der Einzugsgebiete in Österreich die maximalen jährlichen Hochwasserabflüsse zugenommen, besonders in kleinen Gebieten nördlich des Alpenhauptkamms. Die Trends seit 1950 sind weniger deutlich ausgeprägt. Die zukünftige Beurteilung der Veränderung von Hochwässern ist sehr unsicher. Im Norden Österreichs könnten Winterhochwässer verstärkt auftreten (geringes Vertrauen).

Die bisherigen Winterniederwässer im Alpenraum werden mittelfristig höhere Abflusswerte zeigen, und die Schneeschmelze wird früher einsetzen (sehr wahrscheinlich). In den Flachlandgebieten im Süd-Osten ist eine Verschärfung der Sommerniederwässer zu erwarten.

- Schnee

Die Schneefallgrenze ist in Österreich seit 1980 gestiegen – deutlich (signifikant) gestiegen im Sommer, unwesentlich gestiegen (nicht signifikant) im Winter. Die Dauer der Schneebedeckung wird mittelfristig (bis zur Mitte des Jahrhunderts)

besonders in Lagen zwischen 1 000 und 2 000 m zurückgehen (sehr wahrscheinlich). Die Dauer der heutigen Schneebedeckung an einem Standort wird bis zur Mitte des Jahrhunderts erst in einer Höhenlage, die um etwa 200 Meter bergwärts verschoben ist, auftreten (wahrscheinlich).

- Gletscher

In den letzten Jahrzehnten haben sämtliche Gletscher Österreichs deutlich an Fläche und Volumen abgenommen. So hat der Hintereisferner vom Herbst 1964 bis zum Herbst 2007 21 m Wasseräquivalent verloren, das sind ca. 23 m Eisdicke über den ganzen Gletscher gemittelt. Der Effekt auf den Wasserhaushalt Österreichs ist vernachlässigbar. Der Beitrag der Gletscher zum Abflussgeschehen ist aber von regionaler Bedeutung.

Das Abschmelzen der Gletscher setzt sich fort (sehr wahrscheinlich), wobei das zukünftige Klimaszenario eine relativ geringe Rolle spielt, da ein substanzieller Teil des zukünftigen Massenverlustes als Anpassung an die bereits vergangene Klimaänderung zu verstehen ist. Im optimistischen Fall stabilisieren sich die österreichischen Gletscher gegen Ende des 21. Jahrhunderts bei etwa 20 % des momentanen Eisvolumens.

- Wassertemperatur

Seit den 1980er Jahren sind die Wassertemperaturen in Österreichs Flüssen um ca. 1,5 °C im Sommer bzw. 0,7 °C im Winter (Mittelwert über alle Messstellen) gestiegen. Eine weitere Erhöhung der Wassertemperatur ist in allen Seen und Fließgewässern zu erwarten, doch wird diese regional unterschiedlich ausgeprägt erfolgen (sehr sicher). Mittelfristig (bis Mitte des Jahrhunderts) wird der weitere Anstieg der Wassertemperatur in den Seen zwischen 1,2 und 2,6 °C liegen (wahrscheinlich). Die Unterschiede sind durch die Lage der Seen, das Volumen der Wasserkörper, deren Durchmischung und durch unterschiedliche Zuflussmengen erklärbar.

- Trinkwasser

Österreich deckt seinen Hauswasserbedarf (derzeit ca. 8 mm / Jahr bezogen auf die Gesamtwasserbilanz) aus Quell- und Grundwasser. Der pro-Kopf-Wasserverbrauch ist in Österreich rückläufig. Bezüglich der Trinkwasserversorgung kann zukünftig bei kleinen Versorgern mit ungünstigen Rahmenbedingungen (Südoststeiermark, Teile Oberösterreichs) eine Beeinträchtigung der Versorgungssicherheit auftreten (unsicher). Die Grundwasserneubildung dürfte in den niederschlagsärmeren Gebieten mittel- bis langfristig rückläufig sein (wahrscheinlich). Für Wasserversorgungsanlagen im alpinen Raum sowie bei ufernahen Grundwasserentnahmen ist keine quantitative Beeinträchtigung zu erwarten. Qualitativ können durch häufigere Starkregenereignisse (geringes Vertrauen) verstärkt Trübungen auftreten, die technisch zu beseitigen sind.

- Bewässerung

Die jährliche Bewässerungsmenge variiert und beträgt derzeit, bezogen auf die Gesamtwasserbilanz, durchschnittlich etwa 2 mm / Jahr und hat daher nur untergeordnete Bedeutung. Da aber die Bewässerungsmengen überwiegend durch Entnahmen aus regionalen Grundwassersystemen abgedeckt werden, sind sie für die regionale Wasserbilanz durchaus von Bedeutung.

Infolge erhöhter Temperaturen steigt der Wasserbedarf der Pflanzen, insbesondere der Kulturpflanzen. In einigen Gebieten im Osten und Südosten könnte der Beregnungsbedarf zunehmen (wahrscheinlich). Da die Vegetationsperiode auch früher einsetzen wird, ist eine Abschätzung des zusätzlichen Bedarfs unsicher. In den niederschlagsarmen Anbauregionen Österreichs werden Sommerkulturen zunehmendem Hitze- und Trockenstress ausgesetzt sein (wahrscheinlich).

- Wasserkraftnutzung

Österreich deckt derzeit etwa 60 % des Verbrauchs elektrischer Energie durch Wasserkraft. Aufgrund des stetig steigenden Energieverbrauchs und des geringen Zuwachses an neuen Wasserkraftanlagen nimmt der Anteil der Wasserkraft an der Gesamtenergieproduktion stetig ab.

Mittelfristig (bis zur Mitte des Jahrhunderts) ist ein leichter Rückgang der Wasserkrafterzeugung (wahrscheinlich) zu erwarten, wobei die Wintererzeugung zunehmen wird. Langfristig (bis Ende dieses Jahrhunderts) ergeben sich Unterschiede in den Simulationen, die auf verschiedenen regionalen Klimamodellen aufbauen, doch ist eine weitere Abnahme der Jahresenergieerzeugung (+5–15 %) zu erwarten (geringes Vertrauen).

- Kühlwasserbedarf

Bezüglich Kühlwasserbedarf sollten mittelfristig (bis Mitte des Jahrhunderts) die Anlagen an den größeren Flüssen (Drau, Inn, Mur, Donau) keinen wasserwirtschaftlichen Einschränkungen unterliegen (wahrscheinlich). An Voralpenflüssen könnten längerfristig in den Sommermonaten Engpässe auftreten.

2.1 Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Hydrosphäre
2.1 Impacts of climate change on the hydrosphere

Folgende Komponenten des Wasserkreislaufs werden in der angegebenen Reihenfolge behandelt: Schnee und Gletscher, Permafrost, Fließgewässer, limnische Systeme, Boden- und Grundwasser und wasserwirtschaftliche Nutzungen. Diese beinhalten eine Darstellung des Trinkwasserbedarfs, des landwirtschaftlichen Bewässerungsbedarfs, sowie der hydroelektrischen Energieerzeugung und des zu erwartenden Kühlwasserbedarfs. Da eine ausführliche Beschreibung der Niederschlagsveränderungen in Band 1, Kapitel 4 enthalten ist, wird im Abschnitt 2.8 nur eine zusammenfassende Darstellung der Entwicklung der Wasserbilanz, bzw. deren Komponenten Niederschlag, Abfluss und Verdunstung, gegeben. Detaillierte Aussagen zu Abflussänderungen enthält Abschnitt 2.5, in dem auch verschiedene treibende regionale Klimamodelle herangezogen werden.

In den einzelnen Abschnitten dieses Kapitels werden zuerst die in den letzten 50 bis 60 Jahren beobachteten Veränderungen im Wasserkreislauf dargestellt, wobei insbesondere auf die klimabedingten Aspekte eingegangen wird. Zusätzlich ist in den beobachteten Zeitreihen auch der direkte anthropogene Einfluss enthalten. Dieser wird durch die Veränderung der Landschaft und Landnutzung sowie durch wasserwirtschaftliche Maßnahmen, wie z. B. durch Speicheranlagen und Ausleitungen, verursacht. In manchen Einzugsgebieten ist der anthropogene Einfluss deutlich ausgeprägt, doch wird in diesem Kapitel darauf nicht explizit eingegangen.

Anschließend werden die bis Ende des 21. Jahrhunderts zu erwartenden Veränderungen diskutiert. Da die hydrologischen Prozesse und der Wasserkreislauf eine hohe räumliche und zeitliche Variabilität aufweisen, bestehen in den prognostizierten Auswirkungen durch Klimaveränderungen große Unsicherheiten. Zur Quantifizierung der Unsicherheiten werden diverse Studien, Publikationen und vielfach auch „graue Literatur" herangezogen und der Fokus auf die Analyse von Mechanismen und Prozessen gelegt.

Methodisch werden für die Abschätzung der zukünftigen Veränderungen mehrere regionale Klimaszenarien mit unterschiedlichem Antrieb und räumlicher Auflösung herangezogen. Insbesondere werden die Ergebnisse des CLM-ECHAM5-A1B-Modells, des REMO-UBA-Modells (A2, A1B, B1), sowie die A1B-Simulationen des ARPEGE-ALADIN und Reg-CM3 aus dem ENSEMBLES-Projekt verwendet. Ergänzend wurden dann noch Szenarien (RCP2.6 und RCP8.5) des 5. Sachstandsberichts des IPCC, sowie verschiedene Downscaling-Verfahren, Sensitivitätsuntersuchungen und vergleichende Analysen (räumlich und zeitlich) herangezogen. Damit kann der Schwankungsbereich in den Aussagen eingegrenzt werden.

2.2 Schnee
2.2 Snow

2.2.1 Einleitung

Aufgrund des Einflusses der Schneedecke auf den Energie- und Wasserhaushalt spielt ihre räumliche Ausdehnung eine wichtige klimatische und hydrologische Rolle, die eine ausgeprägte Saisonalität aufweist. Durch ihre Eigenschaften, Sonnenlicht zu reflektieren und Wasser temporär zu speichern, steht die Schneedecke in enger Wechselwirkung mit dem Klima (Hantel et al., 2000; ZAMG, 2012). Die Schneedecke ist aber nicht nur räumlich sehr heterogen, auch die Schwankungen zwischen einzelnen Wintern können enorm sein. Ein schneearmer Winter oder auch mehrere schneearme Winter hintereinander können daher nicht ohne weiteres als Folge des Klimawandels angesehen werden. Eine systematische und für Österreich flächendeckende Analyse der historischen, räumlich-zeitlichen Dynamik der Schneedecke steht, anders als z. B. für die Schweiz, noch aus. Derzeit liegt nur eine Auswertung für die Subregion des Sonnblick-Massivs (Schöner et al., 2009) vor. Im Rahmen des Projektes SNOWPAT.at (ACRP-Programm) wird dies aber derzeit nachgeholt (ZAMG, 2013).

Der Schneereichtum in Österreich ist hauptsächlich von der Seehöhe sowie von der Lage des Gebiets relativ zu den Hauptströmungsrichtungen des Windes abhängig. Er variiert dementsprechend stark. Unter 1 200 m Seehöhe fällt die größte Schneemenge meist im kältesten Monat, dem Jänner. In den höheren Lagen treten die ergiebigsten Schneefälle wegen der milderen und wasserdampfreicheren Luftmassen erst im März und April auf, in Seehöhen über 3 000 m von Mai bis Anfang Juni. Im österreichischen Flächenmittel fallen in einem mittleren Jahr etwa 3,3 m Neuschnee, wobei es im Raum Krems nur 30 cm, am Sonnblick hingegen 22 m sind (Böhm, 2008). Die Grenze ganzjähriger Schneebedeckung liegt derzeit in den Nördlichen Kalkalpen bei etwa 2 700 m, in den Hohen Tauern bei 2 900 m und in den Ötztaler Alpen bei knapp über 3 000 m Seehöhe (Auer et al., 2001 a,b; Hiebl et al., 2011).

2.2.2 Beobachtete Schwankungen und raumzeitliche Trends des gefallenen Schnees und der Schneefallgrenze

Wesentliche Kenngrößen zur Beschreibung der Schneedecke sind mittlere jährliche Neuschneesummen, Schneehöhen, Schneedichte, Dauer der Schneebedeckung und Höhenlage der Schneegrenze.

Regelmäßige Messungen des Schnees werden in Österreich vom Hydrographischen Zentralbüro, der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), den Lawinenwarndiensten der Bundesländer, einzelnen Energieversorgern, Universitätsinstituten und der Gemeinde Wien (MA31) durchgeführt. Längere Aufzeichnungen zu Schneemessungen, die eine zeitliche Untersuchung von Schwankungen und Trends ermöglichen, liegen vorwiegend vom Hydrographischen Zentralbüro und der ZAMG vor. Während bei ersterem bereits zu Beginn der Messungen das Schwergewicht auf den Schnee gelegt wurde und daher Zeitreihen seit 1893 existieren (Neuschneesumme, Schneehöhe), wurde der Schnee von der ZAMG erst später ins Messprogramm aufgenommen. Tägliche Neuschneesummen liegen ab 1984 vor, tägliche Schneehöhen sind ab ca. 1925 verfügbar. Nur an einzelnen Sonderstandorten, wie dem Sonnblick, wurden von der ZAMG schon früher Schneemessungen durchgeführt. Das Tagesdatenarchiv der ZAMG wurde durch einen Brand während des Zweiten Weltkriegs fast zur Gänze vernichtet.

Erste Bearbeitungen von Schneekenngrößen erfolgten in Österreich durch Steinhauser (1970, 1976) und Lauscher (1993) für Wien und Innsbruck, sowie durch Fliri (1991) für Tirol. Eine umfangreiche Aufarbeitung der österreichischen Schneemessreihen, mit besonderer Berücksichtigung der Datenqualität, erfolgte durch Mohnl (1994). Bis zu diesem Zeitpunkt wurde auf Monats- bzw. Jahreswerte der Schneekennzahlen zurückgegriffen. Tageswerte lagen noch nicht in digitaler Form vor. Daher wurden im Rahmen von StartClim1 (Schöner et al., 2003), StartClim2007 (Auer et al., 2008) sowie des Projekts FORALPS (Jurkovic et al., 2005) die Schneemessdaten für Österreich digitalisiert und durch Jurkovic (2008) analysiert.

Die Aufarbeitung der Schneemessreihen in Österreich zeigt in den zeitlichen Trends für die Parameter Neuschnee und Schneedecke ein sehr heterogenes Bild (Mohnl, 1994): deutlich positive Trends stehen negativen Trends gegenüber; räumliche Muster sind nur schwer abzuleiten. An ungefähr der Hälfte der Messstationen konnte kein statistisch signifikanter Trend festgestellt werden. Die Schneearmut der 1990er Jahre, obwohl damals noch nicht zur Gänze erfasst, liegt innerhalb der Grenzen natürlicher statistischer Schwankungen (Mohnl, 1994). Erste Auswertungen der Schneehöhen der StartClim-Stationszeitreihen zeigen für das zwanzigste Jahrhundert einen eher abnehmenden Trend der Schneedeckendauer für den Süden von Österreich und eher gleichbleibende bis zunehmende Trends der Schneedeckendauer für den Norden und Osten Österreichs (Jurkovic, 2008).

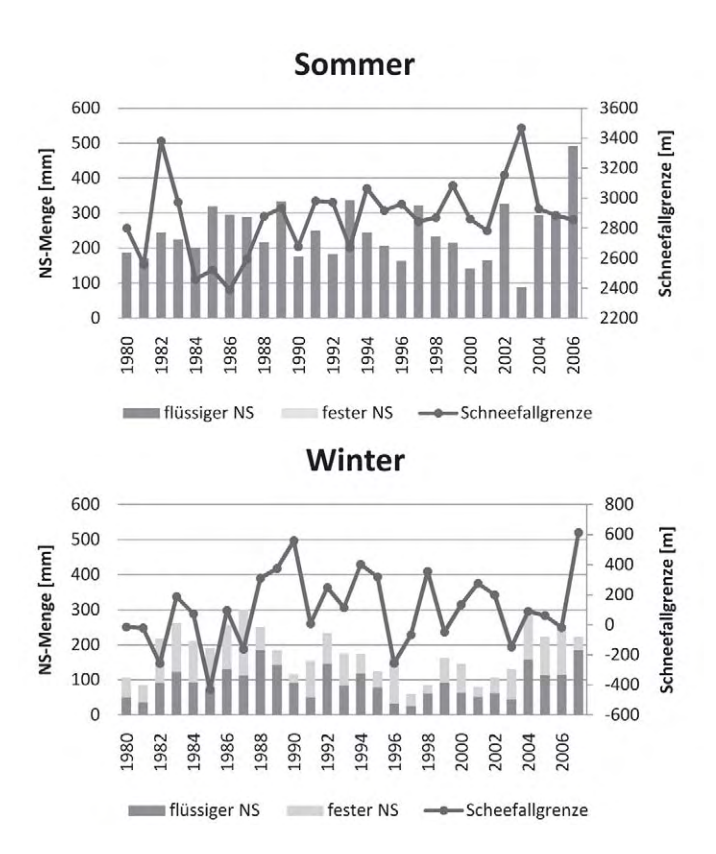


Abbildung 2.1 Änderung der potenziellen Schneefallgrenze sowie des flüssigen und des festen Anteils des Niederschlags in Wien (Hohe Warte) für den Sommer (links) und für den Winter (rechts). Quelle: Hofer (2007)

Figure 2.1 Observed changes in the altitude of the potential snow line and annual figures of rain and snowfall in Vienna (left summer, right winter). Source: Hofer (2007)

Steinacker (1983) führte eine eingehende meteorologische Analyse der Schneefallgrenze in Österreich durch und zeigte die Bedeutung der Feuchttemperatur im Vergleich zur Lufttemperatur als bessere Vorhersagegröße. Darauf aufbauend erfolgten weitere Untersuchungen über raum-zeitliche Änderungen der Schneefallgrenze durch Hofer (2007) und Rohregger (2008). Aus diesen Arbeiten liegen Zeitreihen der Schneefallgrenze vor, die bis 1980 zurückreichen. Der Übergang von festem zu flüssigem Niederschlag wurde bei 1 °C Feuchttemperatur angesetzt. Es zeigt sich für alle Jahreszeiten ein Anstieg der Schneefallgrenze, der am deutlichsten für den Sommer ausfällt, am geringsten für den Winter. Abbildung 2.1 zeigt

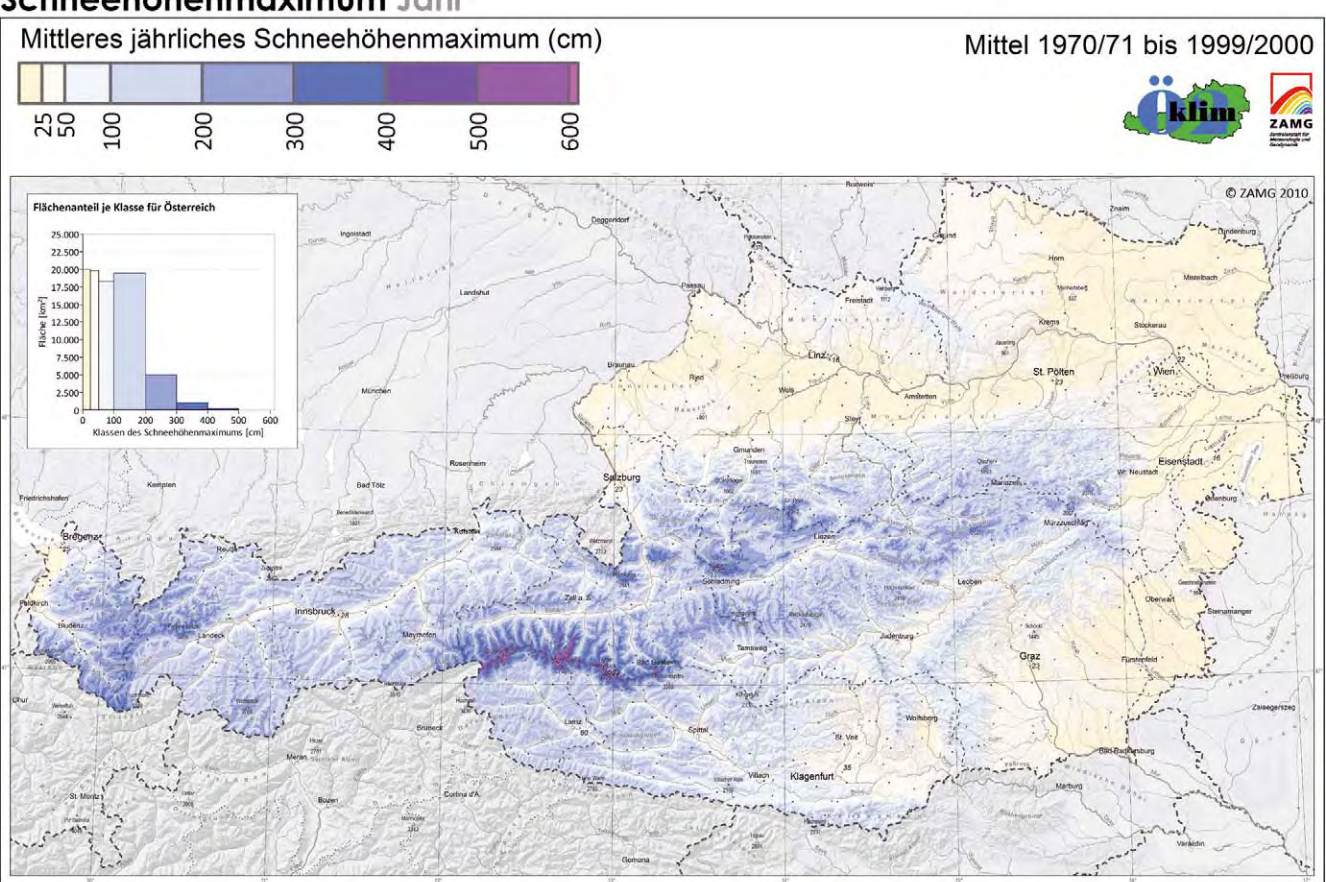


Abbildung 2.2 Karte des mittleren Schneehöhenmaximums in Österreich für die Periode 1971–2000. Quelle: Hiebl et al. (2011)
Figure 2.2 Spatial distribution of mean annual maxima of fresh fallen snow over Austria. Period from 1971–2000. Source: Hiebl et al. (2011)

dies beispielhaft für die Station Wien (Hohe Warte). Der deutlichere Anstieg der Schneefallgrenze im Sommer ist in guter Übereinstimmung mit dem stärkeren Anstieg der Lufttemperatur im Sommer. Im Winter sind die Änderungen nur schwach ausgeprägt. (siehe auch Band 1, Kapitel 3). Weiters konnte Hofer (2007) deutliche Abweichungen zwischen einer (rechnerischen) potenziellen Schneefallgrenze (Berücksichtigung aller Tage) im Vergleich zur zu tatsächlichen Schneefallgrenze (nur Tage mit Niederschlag) für den Winter zeigen. Die tatsächliche Schneefallgrenze liegt über der potenziellen, was Hofer durch den vorwiegenden Anteil von Niederschlägen aus Warmfronten im Winter erklärt.

Klimakarten des Schnees für verschiedene dreißigjährige Klimanormalperioden liegen aus mehreren Arbeiten für Österreich vor (Schöner et al., 2001; Schöner und Mohnl, 2000; Schöner und Mohl, 2003; Hiebl et al., 2011). Derartige Rasterdaten sind nicht nur eine wichtige Planungsgrundlage (z. B. zur Berechnung von Schneelasten für Bauwerke), sondern auch eine wesentliche Grundlage zur Bestimmung von Klimaregionen. Das Beispiel in Abbildung 2.2 zeigt sehr deutlich die wesentlich kleineren Neuschneesummen bzw. maximalen Schneehöhen für das Gebiet der Ötztaler Alpen im Vergleich zu den Hohen Tauern, obwohl die Seehöhen beider Regionen in einem ähnlichen Bereich liegen.

Zum Zusammenhang von Klimaänderung und Schneedecke in Österreich wurde ein statistisches Modell entwickelt, das den Zusammenhang von Schneedeckendauer und Lufttemperatur beschreibt. Die Median-Schneelinie, die nicht der oben erwähnten Schneefallgrenze entspricht, sondern das Produkt aus Schneeakkumulation und Schneeablation im Gelände darstellt, beschreibt jene Seehöhe, ab der in 50 % der Wintertage mit einer Schneehöhe größer 5 cm zu rechnen ist. Für den Alpenraum ergibt das als Mittel der Periode 1961 bis 2000 eine Seehöhe von 705 m im Winter und 2 585 m im Sommer (Abbildung 2.3). Auf dieser Seehöhe ist die Empfindlichkeit der Schneelinie gegenüber einer Temperaturänderung am größten (Hantel et al., 2012). Weiters wurde eine Empfindlichkeit der Median-Schneelinie gegenüber einer sogenannten Alpentem-

peratur von 123 (±17) m / °C gefunden sowie ein zeitlicher Trend der Median-Schneelinie von 52 (±39) m / 10 Jahre für die Periode 1961 bis 2010 festgestellt, was einem Anstieg der Schneelinie um ca. 50 m / 10 Jahre entspricht. In Hantel & Maurer (2011) wurde eine Anpassung mit einem einfachen logistischen Modell vorgenommen.

Diese Aussagen über Änderungen der Schneelinie sind als Mittelwert für die österreichischen Alpen zu interpretieren, da die räumliche Variabilität der Temperaturempfindlichkeit der Schneedeckendauer (und damit auch der Schneelinie) innerhalb Österreichs sehr groß ist. Lokal können daher Temperaturänderungen von 1 °C zu einer deutlich größeren oder kleineren Änderung der Schneelinie führen. Außerdem werden die Schneedeckendauer und die Schneelinie nicht nur durch die Lufttemperatur bestimmt, sondern auch ganz deutlich von der Niederschlagsmenge und durch die räumlichen Unterschiede der Temperaturempfindlichkeit (Abbildung 2.3).

Langjährige Aufzeichnungen der Schneehöhe aus dem hochalpinen Bereich des Rauriser Sonnblicks, die bis 1928 zurückreichen (Schöner et al., 2009), weisen Extremschneehöhen von über 10 m in den 1940er bzw. 1950er Jahren aus. Im Zeitraum von 1970 bis 2005 wurden dann wesentlich geringere jährliche Schwankungen verzeichnet, wobei das langjährige Mittel bei etwa 350–400 cm lag.

2.2.3 Zukünftige Veränderungen der Schneehöhen

Die räumliche Verteilung und Dynamik der Schneehöhe hängt von einer ganzen Reihe von Klimaelementen ab. Die wichtigsten Einflussfaktoren sind der Niederschlag, die Temperatur, die Strahlung sowie Wind und Feuchte. Weiters sind noch die Topographie, laterale Transportprozesse und Interaktion mit der Vegetation zu berücksichtigen. Sowohl die Einflussfaktoren als auch die Prozesse weisen eine starke raumzeitliche Variabilität auf. Es ist daher schwierig, Aussagen über die Auswirkungen des Klimawandels auf die Verteilung der Schneehöhen auf regionaler und besonders lokaler Skala zu treffen. Generell ist auch für zukünftige Schneehöhen – wie bisher schon – ein räumlich sehr heterogenes Bild zu erwarten. Dort, wo möglicherweise vermehrte Winterniederschläge immer noch als Schnee fallen, können die Schneemengen auch zunehmen. Insgesamt bzw. in den übrigen Gebieten ist mit einer Abnahme zu rechnen. Es ist aber keineswegs so, dass Winter mit besonders viel Schnee auch Winter mit besonders lange anhaltender Schneedeckendauer sein müssen und umgekehrt.

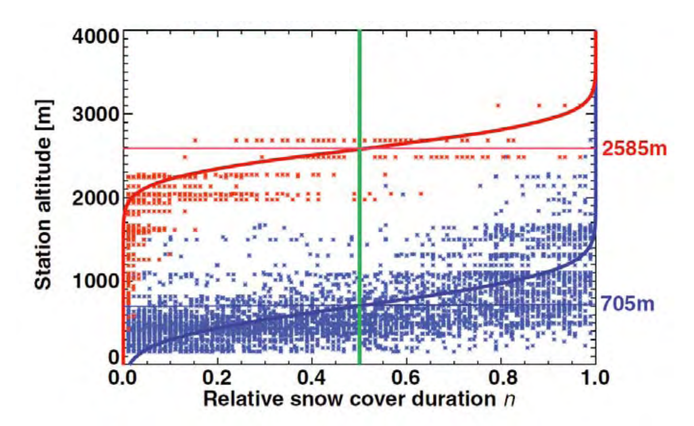


Abbildung 2.3 Schneedeckendauer (%) in Abhängigkeit der Seehöhe der Klimastationen von 1961–2010. Relative Dauer der Schneebedeckung n: prozentueller Anteil der Tage mit einer Schneedecke größer 5 cm. Sommer (J, J, A) rote Signatur, Winter (D, J, F) blaue Signatur. Quelle: Hantel & Maurer (2011); www.schweizerbart.de

Figure 2.3 Snow cover duration in the period 1961–2010 as a function of altitude. Relative snow cover duration n: percentage of days with a snow layer thicker than 5 cm. red for summer (J, J, A) and blue for winter (D, J, F) (Source: Hantel & Maurer (2011); www.schweizerbart.de

2.2.4 Zukünftige Veränderungen der Schneedeckendauer

Durch den Klimawandel steigen generell auch die Wintertemperaturen und damit auch die Schneefallgrenze. Somit werden sich in Zukunft auch die Anzahl der Tage mit Schneefall bzw. als Folge daraus die Tage mit Schneebedeckung weiter reduzieren. Dieser Effekt ist abhängig von der Höhenlage, aber nicht linear, und wird sich besonders im Spätherbst und in den Frühlingsmonaten manifestieren. Am stärksten wird sich die Verkürzung der winterlichen Schneedeckendauer in Höhenlagen zwischen 1 000 und 2 000 m auswirken, d. h. es ist ein späterer Beginn und früheres Abschmelzen des Schnees zu erwarten. Festgestellt wurde dieses Phänomen bereits von verschiedenen Forschergruppen (Böhm, 2008; Formayer et al., 2009; Strasser et al., 2011). Schneereiche Winter wird es in Abhängigkeit von der Großwetterlage aber auch in Zukunft geben, wenngleich seltener als in der Vergangenheit. Nicht übersehen werden darf aber die starke, kurzfristige Variabilität der Schneebedeckung von Jahr zu Jahr (ZAMG, 2012; Böhm, 2008), welche um ein Vielfaches größer ist als der Einfluss des Klimawandels. Dieser kann besonders für die Schneedeckendauer nur an langfristigen Trends erkannt werden.

In den globalen Klimamodellen wird Schnee nach wie vor nur sehr grob repräsentiert. Die Modellierung der Schneedecke ist stark von der Skala des verwendeten Modells abhängig. Daher muss eine realitätsnahe Verteilung der Schneedecke und

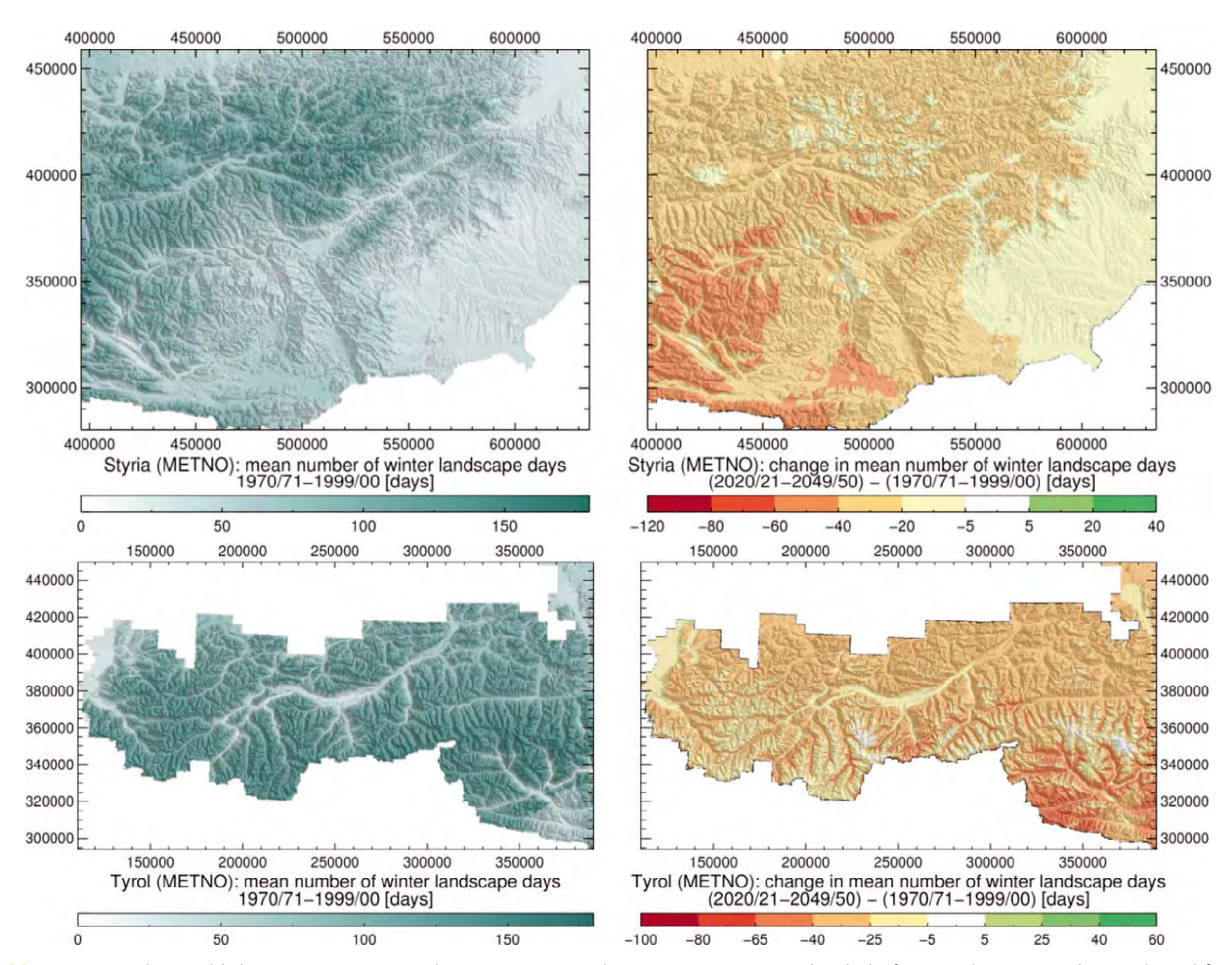


Abbildung 2.4 Mittlere Zahl der Tage mit einem Schneewasseräquivalent > 15 mm („Winterlandschaft") zwischen November und April für die Referenzperiode 1970/71–1999/00 (links) und Veränderung im Zeitraum 2020/21–2049/50 relativ zur Referenzperiode (rechts) für die Steiermark (oben) und Tirol (unten). Quelle: CC-Snow (2013a)

Figure 2.4 Left: Mean number of days with a snow water equivalent > 15 mm (winter landscape) from November to April in the period 1970/71–1999/00. Right: expected changes for the period 2020/21–2049/50 compared to the reference period 1970/71–1999/00). Top: Styria, bottom: Tyrol. Source: CC-Snow (2013a)

deren räumlich-zeitliche Dynamik mit separaten Schneedeckenmodellen berechnet werden, welche auf die regionale Skala anzupassen sind. Die Auswirkungen des Klimawandels auf die zukünftige Schneedeckendauer und -ausdehnung wurde im Rahmen des ACRP-Projekts CC-Snow (CC-Snow, 2013 a, b) exemplarisch für die Steiermark und Tirol untersucht (Strasser et al., 2011). Diese beiden Gebiete sind repräsentativ für die hinsichtlich des Winterniederschlags sehr unterschiedlichen Subregionen West und Südost. Als Eingangsdaten dienten die Ergebnisse des A1B-Emissionsszenarios aus dem ENSEMBLES-Projekt (van der Linden und Mitchell, 2009), welches eine geringfügige Zunahme der Winterniederschläge sowie eine allgemeine Erwärmung für die Untersuchungsgebiete prognostiziert. Diese Daten wurden mit einem Downscaling-Verfahren auf die regionale Skala übertragen (Wilcke et al., 2011) und damit das Temperatur-Index-Schneemodell SNOWREG angetrieben. Die zukünftige Entwicklung der Schneedecke wurde mittels einer Reihe von Indikatoren dargestellt (Ragg, 2011; Strasser et al., 2011). Exemplarisch gezeigt werden soll hier das Ergebnis der METNO-Realisierung (globaler Antrieb HadCM2Q3, Regionalmodell HIRHAM) für den Indikator „weiße Winterlandschaft" (Schneewasseräquivalent > 15 mm), welcher auf dieser Skala gut die Schneedeckendauer beschreibt (Abbildung 2.4). In der historischen Periode ist die Zunahme der Schneedeckendauer mit der Höhe gut zu erkennen, v. a. in Tirol mit Werten von über 150 Tagen (November bis April geschlossene Schneedecke). Man erkennt sowohl die besonders starke Abnahme der Schneebedeckung in den mittleren Höhenstufen (1 000–2 000 m), die dort im Mittel ca. 30 Tage, in den Tallagen (< 1 000 m) und Hochregionen (> 2 000 m) ca. 15 Tage beträgt. Die Abnahme in den Tallagen ist geringer als in den Mittellagen, da es dort ohnehin

weniger Schneedeckentage gibt. In den Hochlagen ist sie auch geringer, da die Schneefälle dort im Winterhalbjahr weniger abnehmen als in den Mittellagen. Auffällig ist, dass sich im Süden und Südosten die weitaus größte Abnahme der Schneedeckendauer von im Mittel ca. 70 Tagen ergibt.

2.2.5 Zusammenfassung Schneebedeckung

Für den Zeitraum 1980 bis 2010 ist zusammenfassend festzustellen:

Die Schneefallgrenze ist in Österreich seit 1980 gestiegen: deutlich (signifikant) gestiegen im Sommer, unwesentlich gestiegen (nicht signifikant) im Winter. Diese Entwicklung deckt sich mit der wesentlich stärkeren Zunahme der Lufttemperatur im Sommer im Vergleich zum Winter.

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass Änderungen der Neuschneehöhe und Gesamtschneehöhe sowohl von Temperatur- als auch von Niederschlagsänderungen bestimmt werden. Im hochalpinen Bereich (Sonnblick) ist seit den 1940er und 1950er Jahren eine deutliche Abnahme der Extremschneehöhen und der Jahr-zu-Jahr-Schwankungen der Schneehöhe festzustellen, die sich gut durch Veränderungen des Niederschlags erklären lassen.

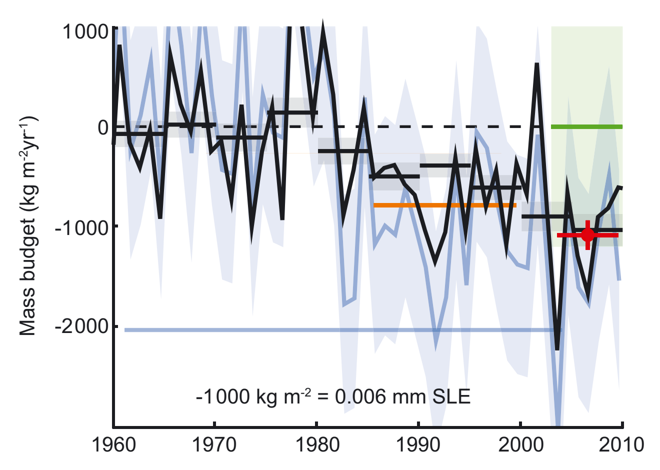
Die Median-Schneelinie besitzt gemittelt über die Periode 1961 bis 1990 im Alpenraum ihre größte Sensitivität gegenüber einer Temperaturänderung ab einer Seehöhe von 705 m im Winter und 2 585 m im Sommer. Sie zeigt eine Sensitivität von 123 (±17) m / °C gegenüber Temperaturveränderungen sowie einen zeitlichen Trend von 52 (±39) m / 10 Jahre. Regionale Unterschiede und Abweichungen sind dabei zu beachten.

Was die zu erwartenden Veränderungen anlangt, ist eine besonders starke Abnahme der Schneebedeckung in den mittleren Höhenstufen (1 000–2 000 m) – im Mittel ca. 30 Tage gegenüber ca. 15 Tagen in den Tallagen (< 1 000 m) und Hochregionen (> 2 000 m) – zu erwarten. Auffällig ist allerdings, dass sich im Süden und Südosten die weitaus größte Abnahme der Schneedeckendauer ergibt (im Mittel ca. 70 Tage).

2.3 Gletscher
2.3 Glaciers

2.3.1 Einleitung

Gletscher existieren dort, wo die langfristige Ablagerung von Schnee (Akkumulation) dessen Abbau (Ablation) übertrifft. Wenn der jährliche Überschuss eine kritische Größe erreicht,



IPCC, 2013: In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Figure 4.11. [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Abbildung 2.5 Regionale Gletschermassenbilanz (kg m^{-2} a^{-1}) für die Region Zentraleuropa (Pfeffer et al. 2014, im Wesentlichen die Europäischen Alpen) aus unterschiedlichen Ansätzen: modelliert aus Klimadaten (blau; jährliche Auflösung: Marzeion et al., 2012, Mittelwert 1961–2004: Hock et al., 2009), differentielle Gravimetrie (grün; Jacob et al., 2012), Interpolation aus lokalen Gletschermessungen (schwarz; jährliche Auflösung: Huss, 2012; Pentadenmittel: Cogley, 2009; rot: Gardner et al, 2013). −1 000 kg m^{-2} entsprechen in den Alpen 0,006 mm Meeresspiegeläquivalent (SLE). Die differentielle Gravimetrie liefert aufgrund der geringen Größe der Gletscher im Alpenraum kein verlässliches Signal (Gardner et al., 2013).Quelle: nach Vaughan und Comiso (2013)

Figure 2.5 Regional glacier mass balances in kg m^{-2} yr^{-1} for Region Central Europe (Pfeffer et al. 2014, mostly European Alps) after different sources: modelled on basis of climate data (blue; on annual basis: Marzeion et al., 2012, mean of 1961–2004: Hock et al., 2009), differential gravimetry (green; Jacob et al., 2012), interpolated from local glacier measurements (black; on annual basis: Huss, 2012; 5 years running mean: Cogley, 2009; red: Gardner et al., 2013). −1 000 kg m^{-2} correspond to 0.006 mm sea level equivalent of Alpine glaciers (SLE). The differential gravimetry gives no reliable signal for the Alpine Region due to the small size of the glaciers (Gardner et al., 2013). Source: after Vaughan and Comiso (2013)

wandelt sich der Schnee in Eis um, das sich wie ein plastisches Medium verformt und dann, ähnlich einem viskosen Fluid, mit Geschwindigkeiten von einigen Metern bis Dekametern pro Jahr talwärts fließt, bis es eine Umgebung erreicht, die genug Energie zuführen kann, dass es schmilzt. Solange das jährliche Defizit am unteren Gletscherende gleich groß wie der jährliche Überschuss im oberen Teil ist, befindet sich der Gletscher im Gleichgewicht und verändert seine Masse und Form nicht wesentlich. Massengewinne und -verluste werden vom Klima und der Topographie bestimmt. Gewinne in der Massenbilanz kommen vom Schneefall und seiner Umverteilung durch Wind und Lawinen, Verluste entstehen durch

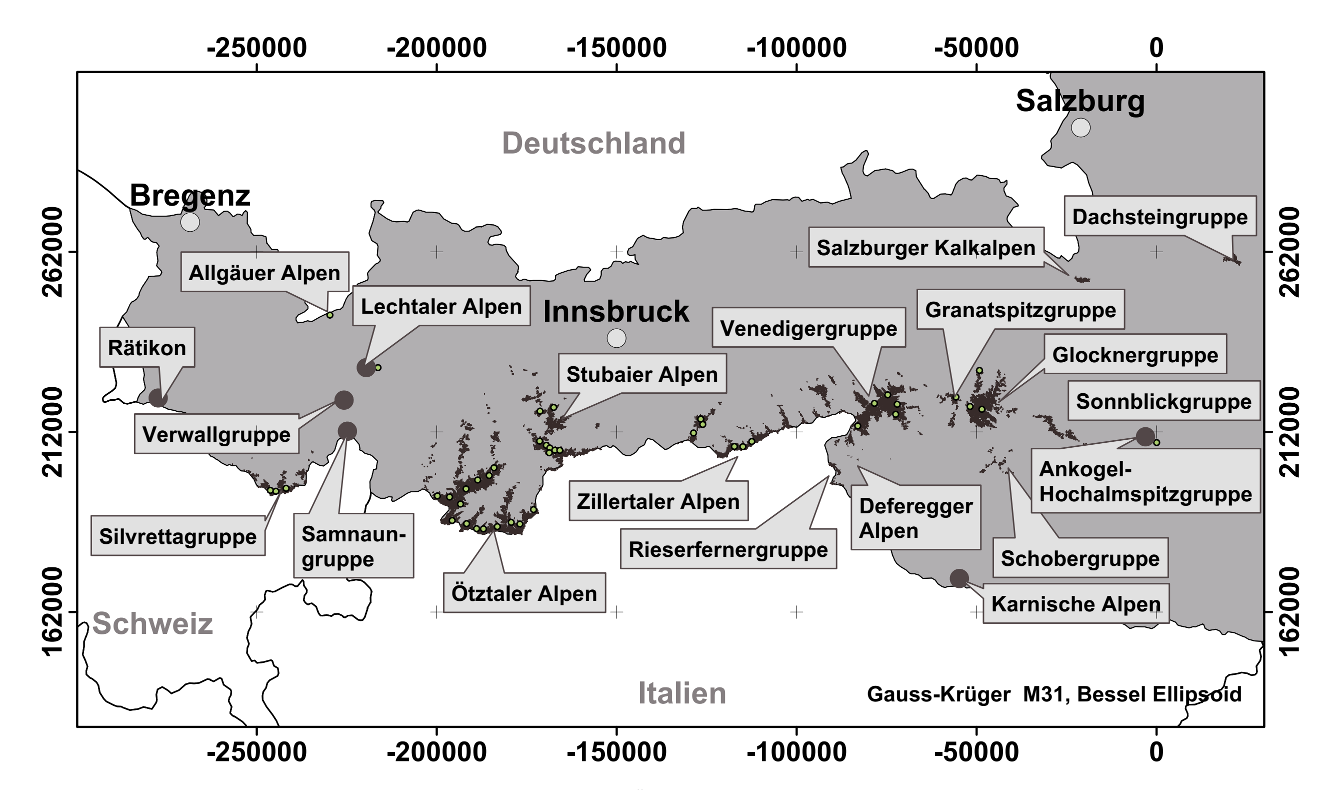


Abbildung 2.6 Die Verteilung der Gletscher (schwarze Flächen) in Österreich. Grafik von A. Lambrecht
Figure 2.6 The spatial distribution of glaciers (black areas) in Austria. Graph by A. Lambrecht

Schmelzvorgänge, Verdunstung und Erosion durch Wind und Lawinen. Das Zusammenspiel der Topographie mit Wind und Lawinen begünstigt die Entstehung von Gletschern in Becken, Mulden und Karen, weniger auf Rücken und Gipfeln.

Da Gletscher stark von den Klimaelementen Niederschlag, Wind, Sonnenstrahlung und Temperatur beeinflusst werden, reagieren sie sehr sensibel auf Veränderungen im Klimasystem und sind daher hervorragende Indikatoren für den Klimawandel. Gebirgsgletscher, zu denen alle Gletscher in Österreich zählen, haben ihrerseits nur räumlich begrenzten Einfluss auf klimatische Verhältnisse, sind aber wichtige saisonale und längerfristige Speicher im lokalen und regionalen Wasserhaushalt.

2.3.2 Die heutige und rezente Lage der Alpengletscher

Seit Beginn der 1980er Jahre werden an den Gletschern in Mitteleuropa kontinuierlich Massenverluste verzeichnet, die im ersten Jahrzehnt des 21. Jahrhunderts nochmals verstärkt wurden (siehe Abbildung 2.5).

2.3.3 Die heutige und rezente Lage der österreichischen Gletscher

Für Österreich liegen zwei flächendeckende Gletscherinventare aus den Jahren 1969 (Patzelt, 1978) und 1998 (Lambrecht und Kuhn 2007; Kuhn und Lambrecht, 2007) vor (siehe Tabelle 2.1). Demzufolge gab es 1998 in Österreich 925 Gletscher oder Eiskörper mit mehr als 1 ha Fläche, die zusammen 452 km^2 bedeckten (Kuhn, 2008; Kuhn et al., 2009b). Abbildung 2.6 zeigt die Verteilung der Gletscherflächen in Österreich, wobei einige sehr kleine Gletscher in den Nördlichen Kalkalpen aus Darstellungsgründen weggelassen wurden. 50 % der österreichischen Gletscherfläche befindet sich in den beiden Gebirgsgruppen Ötztaler Alpen und Venedigergruppe.

Zwischen 1969 und 1998 haben die Gletscher in Summe ca. 16,6 % ihrer Fläche eingebüßt. Obwohl die Raten in Abhängigkeit der Höhenerstreckung in einzelnen Gebirgsgruppe stark variieren, war der relative Flächenverlust von 1969 bis 1998 in den stark vergletscherten Gebirgsgruppen (Ötztaler Alpen, Stubaier Alpen, Glockner- und Venedigergruppe) mit 13 bis 15 % relativ einheitlich. Aus der mittleren Abnahme der Eismächtigkeit von ca. 8,5 m ergibt sich für die Gletscher Österreichs ein Volumsverlust von ca. 4,6 km^3. Basierend auf Dickemessungen an 64 Gletschern (Span et al., 2005; Fischer

Tabelle 2.1 Zusammenfassung der zwei österreichischen Gletscherinventare 1969 und 1998. Quelle: Lambrecht und Kuhn (2007); Kuhn (2008); Kuhn et al. (2009a)

Table 2.1 A summary of the results of the two Austrian glacier inventories of 1969 and 1998. Source: Lambrecht und Kuhn (2007); Kuhn (2008); Kuhn et al. (2009a)

Name der Gebirgsgruppe	Zahl der Gletscher	Gletscherfläche 1969	Gletscherfläche 1998	Relative Flächenänderung	Volumsänderung	Mittlere Abnahme der Eisdicke
	1969	km²	km²	%	1 000 m³	m
Allgäuer Alpen	1	0,1760	0,0874	-50		
Ankogel-Hochalmspitzgruppe	54	19,75	16,15	−18		
Dachsteingruppe	8	6,28	5,69	−9	−52 345	−8,34
Deferegger Alpen	7	0,694	0,427	−38		
Glocknergruppe	79	68,93	59,84	−13	−770 334	−11,18
Granatspitzgruppe	31	9,76	7,52	−23	−57 929	−5,94
Karnische Alpen	1	0,22	0,2	−11		
Lechtaler Alpen	12	0,74	0,69	−7		
Ötztaler Alpen	213	178,01	151,16	−15	−1 479 542	−8,31
Rätikon	3	2,25	1,705	−24		
Rieserfernergruppe	10	4,62	3,13	−32		
Salzburger Kalkalpen	3	2,47	1,68	−32	−25 592	−10,36
Samnaungruppe	37	0,189	0,082	−57		
Schobergruppe	29	5,52	3,49	−37		
Silvrettagruppe	48	24,21	18,86	−22	−238 563	−9,85
Sonnblickgruppe	31	12,76	9,74	−24	−86 819	−6,80
Stubaier Alpen	117	63,05	53,99	−14	−477 405	−7,57
Venedigergruppe	68	93,44	81,01	−13	−854 890	−9,15
Verwallgruppe	37	6,50	4,65	−28		
Zillertaler Alpen	136	65,64	50,64	−22	−604 277	−9,21
	925	542,25	452,00	−16,64	−4 647 696	−8,57

et al., 2007) wird der 1998 noch verbleibende Eisvorrat auf etwa 17 km³ geschätzt, was einer Schicht von 200 mm Wasser über die gesamte Staatsfläche entspricht. Die Genauigkeit der Angaben ist ca. ±1 %. Weitere Details für jeden einzelnen Gletscher in Österreich sind den Inventarberichten (Kuhn, 2008; Kuhn et al., 2009a) zu entnehmen.

Für das erste Jahrzehnt des 21. Jahrhunderts liegen keine österreichweiten Daten vor. Neuere Inventare für die Bundesländer Tirol (Abermann et al., 2009) und Salzburg (Stocker-Waldhuber et al., 2012) zeigen jedoch, dass die bisher beobachteten Veränderungen in verstärkter Weise weiter gehen. Die regionalen und lokalen Ergebnisse zur Gletscherentwicklung in Österreich seit Beginn des 21. Jahrhunderts lassen vermuten, dass die Gletscher im Vergleich seit 1998 deutlich mehr als 20 % des damaligen Volumens verloren haben. Tabelle 2.1 fasst die Ergebnisse der beiden Gletscherinventare von 1969 und 1998 zusammen.

Die zeitliche Änderung der jährlichen Massenbilanzen wird in Abbildung 2.7 am Beispiel des Hintereisferners (Kuhn et al., 1999), der seit Jahrzehnten regelmäßig beobachtet wird, an Hand der mittleren spezifischen Massenbilanz dargestellt. Deren Wert berechnet man z. B. für „1960 / 61“ aus der Höhe der Wasserschicht, die entsteht, wann man die Änderung des Eisvolumens eines Gletschers von 1960 bis 1961 als Schmelzwasser gleichmäßig auf dem Gletscher verteilt. Von den 52 Jahren, die hier gezeigt werden, zeigten nur fünf eine positive Massenbilanz (Die Genauigkeit der Messungen wird mit ±0,1 m geschätzt).

Offensichtlich fand in dieser Zeitreihe Anfang der 1980er Jahre ein Sprung zu negativeren Werten statt, der mit der Zunahme der Lufttemperaturen im Alpenraum zusammenfällt. Die Klimasensitivität dieses Gletschers, d. h. die Abnahme der mittleren spezifischen Massenbilanz pro Grad Erwärmung wurde mit etwa –800 mm / °K berechnet, was mit Werten

anderer Alpengletscher weitgehend übereinstimmt (Hock, 2005).

Extreme Ausmaße hat der Massenverlust im Bilanzjahr 2002 / 2003 erreicht, in dem nach der traditionellen glaziologischen Methode (Schneehöhen und Dichten in ausgewählten Akkumulationsschächten, Eisverlust an Ablationspegeln) am Hintereisferner ein Volumsverlust von 0,018 km³ bestimmt wurde, was etwa 4 % seines Volumens entspricht (Kuhn und Olefs, 2007). Es ist davon auszugehen, dass im letzten Jahrzehnt der Gesamtverlust in etwa 0,10 km³ (das sind ca. 20 % des Volumens) betragen hat. Seit dem Jahr 2001 werden für den Hintereisferner parallel zu den glaziologischen Massenbilanzmessungen jährlich flugzeuggestützte Airborne Laserscanning (ALS)-Messungen durchgeführt (Geist und Stötter, 2008; Bollmann et al., 2011).

Die wenigen Jahre mit positiver Massenbilanz in den 1960er und 1970er Jahren waren typisch für die gesamten Alpen und führten zu beachtlichen Gletschervorstößen. Aus den vom Gletschermessdienst des Österreichischen Alpenvereins jährlich erhobenen Informationen ist abzuleiten, dass um 1980 75 % der ca. 110 der beobachteten Gletscher (z. B. Patzelt, 1985) einen Vorstoß zeigten, heute aber keiner mehr. Als klimatische Ursache für diesen Vorstoß in Zeiten ununterbrochener Zunahme der Treibhausgase wird das sogenannte „Global dimming“, eine globale Abnahme der Sonneneinstrahlung aufgrund zunehmender atmosphärischer Aerosole, angenommen. Ein weiterer Grund wird in der Häufigkeit von kühlen, niederschlagsreichen Sommern gesehen, die die Alpengletscher mit Neuschnee bedeckten, der mehr Sonnenstrahlung reflektiert als das schneefreie, graue Gletschereis. Ein weiterer, wenn auch nicht so unmittelbar interpretierbarer, Hinweis auf das Verhalten der Gletscher sind deren Längenänderungen, die eine individuelle, verzögerte und Tiefpass gefilterte Reaktion jedes einzelnen Gletschers auf geänderte Klimabedingungen darstellen (Abbildung 2.8). Die Anzahl der vorstoßenden Zungen war zwischen 1975 und 1986 am größten, die mittlere Vorstoßlänge allerdings bescheiden. Seit 1986 dominieren Rückzüge der Zungen mit mittleren jährlichen Rückzugsbeträgen von bis zu über 20 m.

2.3.4 Zukünftige Entwicklung der Gletscher und der glazialen Abflüsse

Die einzigen flächendeckenden Aussagen zur Entwicklung der Gletscher in Österreich beruhen auf Modellierungen der Änderung des Eisvolumens und der Gletscherfläche aller einzelnen Gletscher weltweit von Marzeion et al. (2012). Demzufolge wird etwa um das Jahr 2030 das Eisvolumen der österreichi-

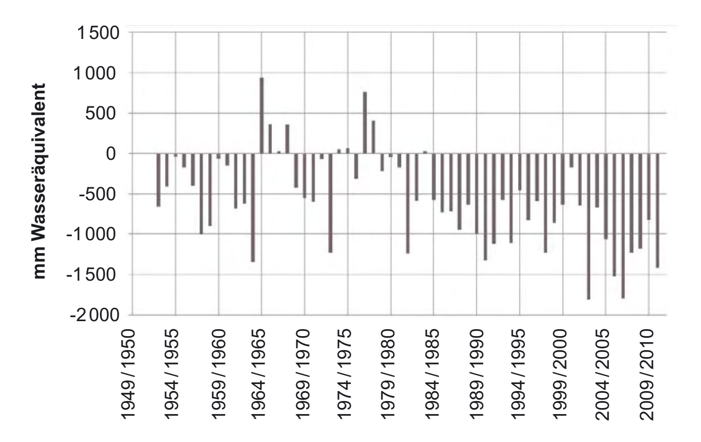


Abbildung 2.7 Die Zeitreihe der jährlichen mittleren spezifischen Massenbilanzen des Hintereisferners 1952 / 53 bis 2010 / 11 in mm Wasseräquivalent. Quelle: Fischer et al. (2012)

Figure 2.7 Time series of the annual mean specific mass balance of Hintereisferner 1952 / 53 to 2010 / 11 in mm of water equivalent. Source: Fischer et al. (2012)

schen Gletscher auf die Hälfte der Mittelwerte der Periode von 1985-2004 gesunken sein. Für den zukünftigen Massenverlust spielt das gewählte Klimaszenario eine relativ geringe Rolle, da ein substanzieller Teil des zukünftigen Massenverlustes als Anpassung auf die bereits vergangene Klimaänderung zu verstehen ist. Im Klimaszenario mit dem geringsten menschlichen Eingriff (RCP2.6) stabilisieren sich die österreichischen Gletscher aber gegen Ende des 21. Jahrhunderts bei etwa 20 % des momentanen Eisvolumens, wogegen das andere Extremszenario (RCP8.5) praktisch zum gänzlichen Abschmelzen der Gletscher in Österreich führt (Abbildung 2.9).

Auch ohne weitere Erwärmung gegenüber dem Zeitraum von 1985 bis 2004 würden die Gletscher ein weiteres Volumen von 14 ± 9 km³ Wasseräquivalent verlieren, ehe sich ein neues Gleichgewicht einstellen könnte.

Hinsichtlich des Gletscherabflusses ist demzufolge davon auszugehen, dass der maximale jährliche Abfluss schon erreicht, wenn nicht gar überschritten ist (Abbildung 2.9, Mitte). Die Wirkung der Flächenabnahme für den Gletscherabfluss ist damit bedeutsamer geworden als die durch die Temperaturzunahme bedingte gesteigert Schmelzrate.

Detaillierte Untersuchungen zur zukünftigen Entwicklung einzelner Gletscher liegen aus den Ötztaler und Stubaier Alpen vor (Weber et al., 2009; Kuhn und Olefs, 2007). Am Beispiel des Vernagtferners modellierten Weber et al. (2009) die Veränderungen unter Annahme eines A1B-Szenarios auf der Basis des REMO-Modells (Jacob et al., 2007) mit einer Zunahme der Lufttemperatur um 5,2 °C bis zum Jahre 2100 sowie einer Zunahme der Winterniederschläge um 7 % und einer Abnahme der Sommerniederschläge um 31 %. Ausgehend von der

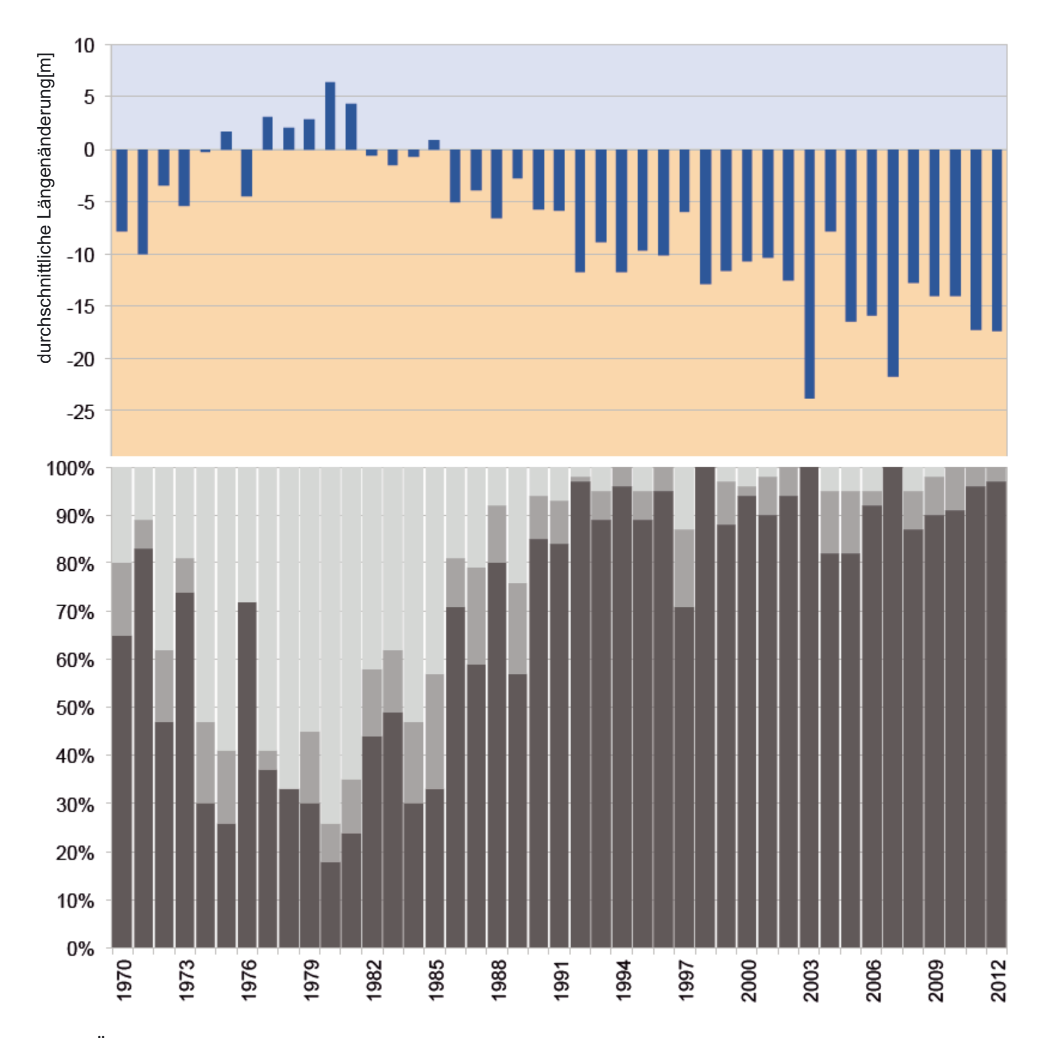


Abbildung 2.8 Mittlere Änderungsbeträge (oben) und Anzahl der vorstoßenden (hellgrau), gleichbleibenden (grau), und zurückweichenden (schwarz) Zungen (unten) von ca. 100 Einzelgletschern in den Österreichischen Alpen. Quelle: Jährlicher Bericht über die Gletschermessungen des Österreichischen Alpenvereins, z. B. Fischer (2013)

Figure 2.8 Average length changes (upper graph) and number of advancing (light grey), stationary (grey), and retreating (black) glacier tongues (lower graph) of ca. 100 glaciers in the Austrian Alps. Source: Annual report on glacier length measurements of the Austrian Alpine Club, e.g. Fischer (2013)

Eisdickenverteilung im Jahr 2006 wird dementsprechend der Vernagtferner schon 2025 in ca. 5 Teilgletscher zerfallen sein. Sowohl die Berechnung der Schneeakkumulation als auch der Schnee- und Eisschmelze erfolgte auf den Gletscherflächen mit dem Gletscherteilmodell „Surges“ (Prasch, 2010).

Abbildung 2.10 zeigt zwei Szenarien für die Entwicklung des spezifischen und des gesamten Schmelzwasserabflusses; eines für den zweitgrößten Gletscher Österreichs, den Gepatschferner mit 17 km² Fläche und Eisdicken über 200 m , das zweite für den Fernauferner im Stubaital mit 1,8 km² und maximal 80 m Eisdicke. Das verwendete Modell wurde mit den Sommertemperaturen und den Änderungen der Eisdicke nach den digitalen Höhenmodellen von 1997 und 2006 kalibriert. Für den großen Gepatschferner wird eine Zunahme des Schmelzwasserabflusses bis zu einer Erwärmung um 3 °C berechnet; beim kleinen Fernauferner tritt das Abflussmaximum schon bei +2 °C in, bei +4 °C ist er fast verschwunden und seine spezifische Bilanz wird weniger negativ, weil nur noch die höchstgelegenen Flächen beitragen.

Sensitivitätsuntersuchungen mit Hilfe von Simulationen (Kuhn und Bartlogg, 1999) zeigen, dass für nivale Abflussregime bei steigenden Temperaturen (–1 bis +3 °C) die Sommerspitze des Abflusses in frühere Monate verschoben und gedämpft wird und im Herbst und Winter wegen des wachsenden Anteils von Regen am Niederschlag höhere Abflusswerte auftreten.

Für die Obere Salzach simulierten Koboltschnig und Schöner (2009, 2011) und Koboltschnig et al. (2009) den heißen

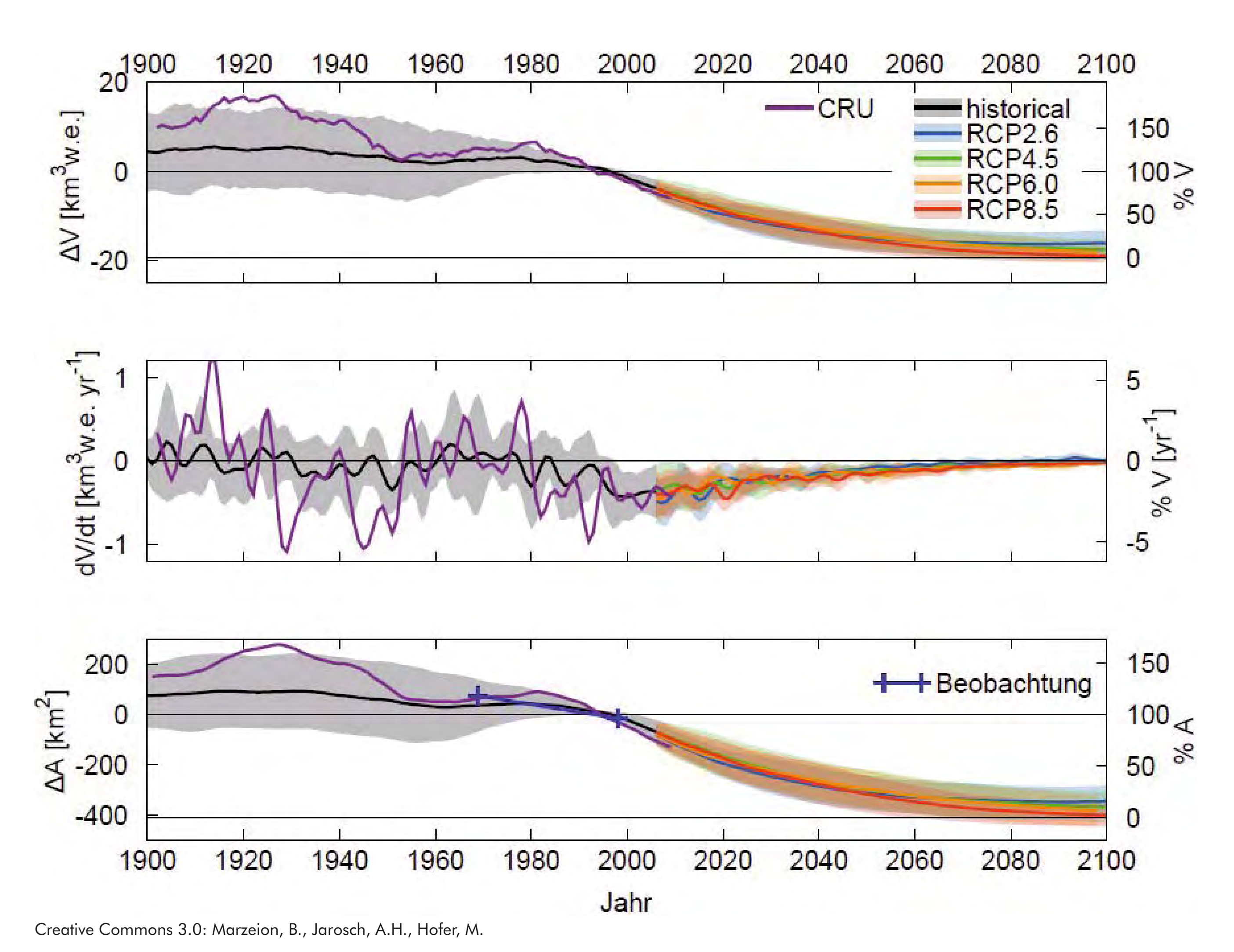


Abbildung 2.9 Rekonstruktionen und Projektionen der Änderung des Eisvolumens und der Fläche der österreichischen Gletscher, nach Marzeion et al. (2012). Das Gletschermodell wurde angetrieben durch Rekonstruktionen und Projektionen des Klimas von globalen Klimamodellen („historical" und „RCP"), gezeigt wird das Ensemble-Mittel und die Ensemble-Standardabweichung. Eine weitere Rekonstruktion wurde angetrieben mit dem beobachteten Klima („CRU", Mitchell und Jones, 2005). Alle Werte relativ zum Mittel 1985–2004. Die beobachtete Flächenänderung bezieht sich auf die Gletscherkataster von 1969 und 1998 (Lambrecht und Kuhn 2007; Kuhn, 2008; Kuhn et al. 2009a). Oben: Änderung des Gesamteisvolumens. Mitte: Änderungsrate des Eisvolumens. Unten: Änderung der Gletscherfläche

Figure 2.9 Reconstructions and projections of ice volume and surface area changes of the Austrian glacier, after Marzeion et al. (2012). The glacier model was driven by reconstructions and projections of global climate models ("historical" and "RCP"). Ensemble means and standard deviations are shown. A further reconstruction was driven by observed climate ("CRU", Mitchell und Jones, 2005). All values relative to mean of 1985–2004. Observed surface area changes in relation to glacier inventory data of 1969 and 1998 (Lambrecht und Kuhn 2007; Kuhn, 2008; Kuhn et al. 2009a). Up: Change in ice volume. Middle: Changing rate in ice volume. Down: Change in glacier area

Sommer 2003 und quantifizierten den Gletscherbeitrag mit 58 % des August-Abflusses am Pegel Mittersill. Das Tagesmaximum des Schmelzbeitrags betrug nahezu 70 %, während der Jahresbeitrag 2003 bei ca. 15 % lag. In einem Sommer mit nur leicht negativer Gletschermassenbilanz sinkt der Anteil der Gletscherschmelze am Abfluss deutlich. Nachtnebel et al. (2009) ermittelten einen Abflussanteil aus der Gletscherzone am Pegel Mittersill für die Sommermonate (Juli, August, September) von 36 % im Jahre 2003, während der Beitrag im Jahr 2004 bei 2,5 % und 2005 bei knapp 6 % lag.

Weitere Analysen zur zukünftigen Entwicklung der Gletscher im Einzugsgebiet des Inn liegen von Weber et al. (2009) und Kuhn und Olefs (2007) vor.

Im Rahmen des GLOWA Danube (Global Change Atlas, 2009) wurden die Veränderungen des Gletscherabflusses im Einzugsgebiet des Inn mit Hilfe des Modells „Danubia" simuliert (Weber et al., 2009). Als Input wurden die Modelloutputs, Niederschlag und Temperatur, vom Regionalmodell REMO (Jacob et al., 2007) und vom MM5-Modell (Global Change Atlas, 2009) herangezogen und auf ein 1 km Raster

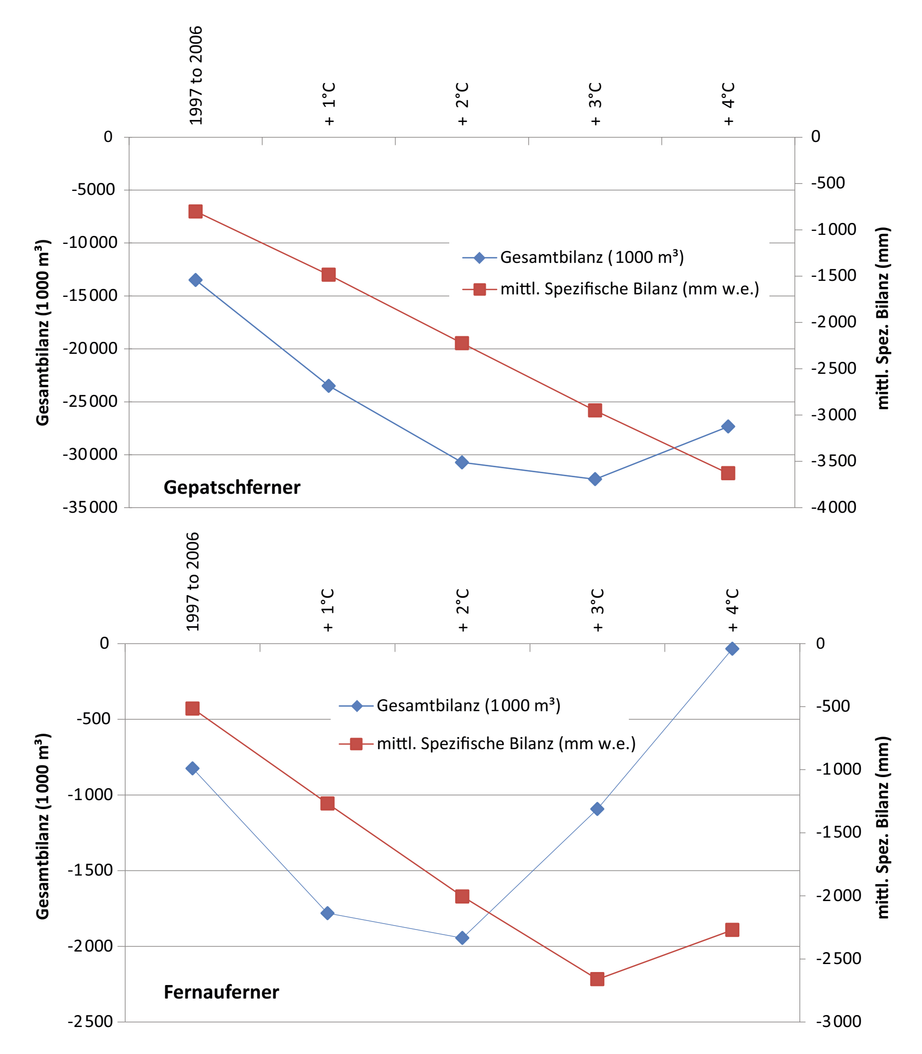


Abbildung 2.10 Szenarien für die mittlere spezifische Massenbilanz und den gesamten Schmelzwasserabfluss bei steigender Sommertemperatur. Der Gepatschferner hat eine Fläche von 17 km² und eine maximale Eisdicke von > 200 m, beim Fernauferner sind es 1,8 km² und 80 m. (Kuhn und Olefs, 2007). Für das Jahrzehnt 2090–2099 wird nach dem A1B-Szenario eine Erwärmung um 2,8 °C erwartet, nach dem A1FI-Szenario eine Erwärmung um 4 °C. Quelle: IPCC (2007a,b)

Figure 2.10 Scenarios of mean specific mass balance and total annual melt water runoff for mean summer temperatures. Gepatschferner has an area of 17 km² and maximum ice thickness > 200 m, Fernauferner has 1.8 km² and a maximum of 80 m. (Kuhn und Olefs, 2007). According to the A1B emission scenario an increase of 2,8 °C is expected for the period 2090–2099, while an increase of 4 °C is expected in the A1F1-scenario. Source: IPCC (2007a,b)

interpoliert. Beide Modelle basierten auf den Ergebnissen des ECHAM5-Klimamodells (Marke, 2008).

Unter diesen klimatischen Randbedingungen wird die derzeitige Eisreserve der Gletscher innerhalb des Untersuchungszeitraums 2011 bis 2060 weitestgehend aufgebraucht sein. Der Schmelzwasserbeitrag der Gletscher steigt vorerst (Dekade 2011 bis 2020) und führt zu deutlich höheren Sommerabflüssen als in der Dekade 1991 bis 2000. Der derzeitige Anteil steigt demnach von 50 % auf mehr als 70 %. Mit der abnehmenden Gletscherfläche verringert sich der Gletscherabfluss stetig, aber erst gegen 2030 wird das durchschnittliche Niveau der Abflüsse vor dem Jahr 2000 wieder erreicht. In den nachfolgenden Jahrzehnten liefern die Gletscher einen deutlichen geringeren Abflussbeitrag als heute. Die Auswirkungen zeigen sich am deutlichsten in Kopfeinzugsgebieten, wie beispielsweise am Pegel der Rofenache in Vent (Abbildung 2.11). Das Einzugsgebiet an der Pegelstelle beträgt 98 km², von denen derzeit ca. 35 % vergletschert sind.

Kuhn et al., (2009a) verwendeten ein Szenario, das auf einem um 20 % reduzierten Sommerniederschlag, einem um 15 % erhöhten Winterniederschlag, sowie Temperaturanstiege um 2 °C im Sommer und 1 °C im Winter aufbaute. Die mögliche Bandbreite des Abflussgeschehens im Einzugsgebiet Obergurgl (Ötztaler Ache) wird demnach in den kommenden zwei bis drei Jahrzehnten zwischen der roten und grünen Linie in Abbildung 2.12 liegen.

Ein Vergleich mit berechneten Gletscherspenden von Kuhn und Olefs (2007) und Koboltschnig und Schöner (2009) ergibt bei gleicher Vergletscherung bei Weber et al. (2009) etwa die 3-fache Menge (Schöner et al., 2011). Je größer das betrachtete Einzugsgebiet gewählt wird, umso geringer wird der Effekt des Gletscherbeitrags. Der derzeitige mittlere Anteil wird z. B. für den Innpegel Innsbruck bei einer Einzugsgebietsfläche von 5792 km² mit 8,4 % des Jahresabflusses und für den Pegel Achleiten / Donau mit einer Fläche von 76 660 km² mit 1,6 % angegeben (Weber et al. 2009).

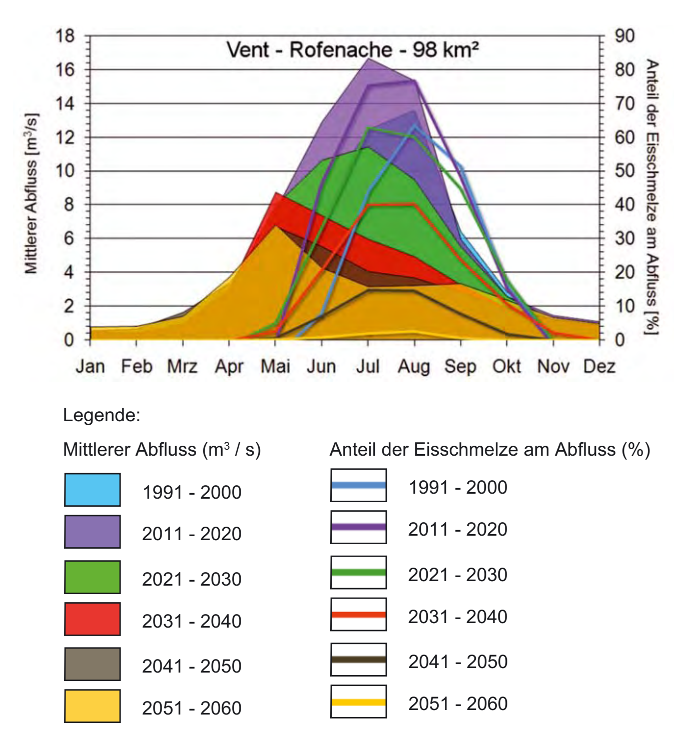


Abbildung 2.11 Dekadendarstellung der zeitlichen Veränderung des Gletscheranteils am Abfluss im Vergleich zu 1991–2000. Quelle: Weber und Prasch (2009)

Figure 2.11 Temporal changes of glacier melt contribution to total runoff (decadal means compared with the period 1991–2000. Source: Weber und Prasch (2009)

Gebietsabfluss (mm)
Monate (hydrologisches Jahr)
Referenzperiode (1982-2003)
Klimaszenario mit Gletscherstand 1997
Klimaszenario ohne Gletscher

Abbildung 2.12 Gemessener Abfluss (Mittelwerte 1982–2003) und Klimaszenarien für das Einzugsgebiet Obergurgl: rot: mit Gletscherfläche von 1997 und Klimaänderung; blau: Referenzperiode 1982–2003; grün: ohne Schmelzbeitrag der Gletscher. Quelle: Kuhn et al. (2009b)

Figure 2.12 Mean seasonal runoff pattern at gauging station Obergurgl (Gurgler Ache): red: with glaciered area in 1997 and under climate change; blue: reference period 1982–2003; green: without any glacier melt contribution. Source: Kuhn et al. (2009b)

2.3.5 Zusammenfassung Gletscher

Wie überall in den Alpen sind auch in Österreich die eisbedeckte Fläche, das Eisvolumen und auch die Anzahl der Gletscher seit dem Ende der „Kleinen Eiszeit" in der Mitte des 19. Jahrhunderts zurückgegangen.

Aus den verschiedenen Simulationen, die unterschiedliche methodische Ansätze und Klimaszenarien verwenden, ergibt sich ein starker Rückgang der Gletscher. Für den zukünftigen Massenverlust der Gletscher spielt das gewählte Klimaszenario eine relativ geringe Rolle, da ein substanzieller Teil des zukünftigen Massenverlustes als Anpassung auf die bereits vergangene Klimaänderung zu verstehen ist. Im Klimaszenario mit dem geringsten menschlichen Eingriff (RCP2.6) stabilisieren sich die österreichischen Gletscher gegen Ende des 21. Jahrhunderts bei etwa 20 % des momentanen Eisvolumens, wogegen das andere Extremszenario (RCP8.5) praktisch zum gänzlichen Abschmelzen der Gletscher in Österreich führt.

Der Beitrag der Gletscherschmelze zum Abflussgeschehen stellt in sehr trockenen und warmen Sommern (z. B. 2003) im inneralpinen Raum eine wesentliche Komponente dar. Der Höhepunkt des mittleren Gletscherbeitrags zum Abfluss dürfte in den österreichischen Alpen durch das Kleinerwerden der Gletscher bereits erreicht oder überschritten sein. Bei einigen Szenarien (A1B) tritt das Maximum der Schmelzabflüsse erst in den nächsten Jahrzehnten auf, je nach Gebiet und Höhenlage des Gletschers.

2.4 Permafrost

2.4 Permafrost

Die Zusammenhänge zwischen Klimawandel und Permafrost sind ausführlich in Band 2, Kapitel 4 dargestellt. Dieser Abschnitt bezieht sich auf die Wechselwirkung von Permafrost und Hydrologie, wobei sowohl die Aspekte der Permafrostverbreitung (flächenhafter Permafrost, unter anderem in Lockersedimentakkumulationen; intakte und reliktische Blockgletscher) und deren Bedeutung für den Wasserhaushalt als auch mögliche Belastungen der Gewässer durch Schwermetallbela-

stungen durch schmelzendes Eis aus Permafrostkörpern beleuchtet werden.

2.4.1 Einleitung

Blockgletscher gelten aufgrund ihrer markanten Erscheinung allgemein als Leitformen des alpinen Permafrosts und wurden deshalb seit Beginn der Permafrostforschung in den Alpen im Detail untersucht (Boeckli et al., 2012). Ein erstes umfassendes Blockgletscherinventar wurde von Lieb (1996) für die östlichen österreichischen Alpen erstellt. Heute ist die Blockgletscherverteilung der österreichischen Alpen in ausreichend gutem Maße bekannt und dokumentiert. Als intakte Blockgletscher (in dieser Gruppe werden aktive und inaktive Blockgletscher zusammengefasst) werden in diesem Zusammenhang jene Blockgletscher bezeichnet, die im Gegensatz zu reliktischen oder fossilen Blockgletschern über einen rezenten Eisgehalt verfügen (vgl. Band 2, Kapitel 4).

Aus hydrologischer Sicht ist insbesondere das Vorhandensein von Eis im Blockgletscherkörper ein wichtiges Kriterium zur Klassifizierung von Blockgletschern in Blockgletscherinventaren. Bezüglich des gespeicherten Wasservolumens können nur Schätzwerte angegeben werden. Für Tirol geben Krainer und Ribis (2012) einen Schätzwert von etwa 0,19 bis 0,27 km^3 an. Im Vergleich zum Eisvolumen der Tiroler Gletscher (13 km^3) beträgt das in Blockgletschern gespeicherte Eisvolumen maximal nur knapp zwei Prozent.

2.4.2 Hydrologische Bedeutung von Blockgletschern

Insbesondere das Vorhandensein von Eis in Permafrostkörpern (Blockgletscher und flächenhafter Permafrost) entscheidet über deren hydrologische Wirkung, wobei der Eisgehalt von Blockgletschern zwischen 40 und 60 % liegt. Krainer und Ribis (2009) analysierten die hydrologische Bedeutung ausgewählter intakter Blockgletscher in den Ötztaler Alpen (Kaiserberg-Blockgletscher) und Stubaier Alpen (Reichenkar-Blockgletscher) anhand von Pegelmessungen. In dieser Arbeit wurde gezeigt, dass der Großteil des Abflusses von der Schneeschmelze und von sommerlichem Niederschlag stammt und nur ein geringer Teil auf abschmelzendes Eis bzw. auf Grund- oder Bergwasser zurückzuführen ist. Ein vergleichbares Ergebnis lieferten auch Untersuchungen stabiler Isotope an beiden Blockgletschern (Krainer und Mostler, 2002; Krainer et al., 2007). Krainer und Mostler (2002) kommen zum Schluss, dass aktive Blockgletscher in hochalpinen Einzugsgebieten nur zu einem geringen Teil zum Gesamtabfluss beitragen. Sie können aber in bedeutendem Maße indirekt zu einzelnen Abflussspitzen beitragen, da sie als Wasserstauer wirken und somit Niederschlagswasser direkt dem Abfluss zuführen (Krainer und Mostler, 2002).

Es ist davon auszugehen, dass flächenhafter Permafrost in Lockersedimenten in ähnlicher Art und Weise auf das Abflussverhalten wirkt, wie dies intakte Blockgletscher tun, wobei anzumerken ist, dass die Mächtigkeiten der Permafrostkörper noch nicht ausreichend gut erfasst wurden.

Seit wenigen Jahren werden Abflüsse aus Blockgletschern auf ihre Schwermetallbelastung untersucht. Dabei wurden in Bächen, die aus Blockgletschern entwässern, hohe Nickel-, Mangan-, Kupfer-, Zink- oder Arsenkonzentrationen festgestellt (Krainer et al., 2012; Nickus et al., 2012; Rogger et al., 2012; Rogger, et al., 2013). Es ist noch nicht gelungen, die Herkunft der Schwermetalle zweifelsfrei zu bestimmen. Es wird angenommen, dass die Schwermetalle im Permafrosteis gespeichert sind und auf atmosphärische Einträge zurückzuführen sind (Krainer et al., 2012).

2.4.3 Zukünftige Veränderungen von Blockgletschern

Nach den IPCC-Temperaturprognosen ist mit großer Wahrscheinlichkeit davon auszugehen, dass heute noch intakte Permafrostkörper in den österreichischen Alpen massiven Veränderungen unterworfen werden und bedeutende Flächen permafrostfrei werden. Aufgrund des geringen absoluten Eisvolumens ist allerdings anzunehmen, dass bei einem gleichbleibenden oder verstärkten Temperaturanstieg – und somit einem Anstieg der Permafrostuntergrenze – der hydrologisch wirksame Beitrag aus Blockgletschern am Gesamtabfluss in den Alpentälern unbedeutend gering bleiben wird. Heute noch rezente und zukünftig reliktische Blockgletscherkörper im Speziellen und Permafrostkörper im Allgemeinen werden in jenen alpinen Gebieten, in denen sie einen bedeutenden Flächenanteil einnehmen, hydrologisch als vergrößerte Grundwasserkörper wirksam werden (Winkler et al., 2012). Insgesamt ist bei einem massiven Ausschmelzen des Permafrosteises wohl von einer verbesserten Retentionseigenschaft des eisfrei gewordenen Untergrundes auszugehen (vgl. auch Rogger et al., 2013).

Demgegenüber ist anzunehmen, dass während der Perioden verstärkter Schmelze des in Permafrostkörpern gebundenen Eises lokal ein Anstieg der Schwermetallbelastung erwartet werden kann. Das betrifft vor allem jene Gewässer, die aus permafrostreichen Regionen entwässern und gegenwärtig schon hohe Schwermetallbelastungen aufweisen.

Die Untersuchungen der letzten Jahre zeigen, dass eine mehr oder weniger kontinuierliche Zunahme der Bodentemperaturen in den österreichischen Alpen (Kellerer-Pirklbauer, 2013) mit einer Degradation von Permafrostflächen verbunden ist.

2.5 Fließgewässer
2.5 Running waters

2.5.1 Einleitung

Der vorliegende Abschnitt fasst die Ergebnisse von Abflussveränderungen im Mittel, im saisonalen Verhalten und in den Extremwerten (Hochwasser, Niederwasser) zusammen. Ausführliche Darstellungen sind in Böhm et al. (2008), ÖWAV (2010) und in der ZAMG/TU-Wien Studie (BMLFUW, 2011) zu finden. Die zukünftigen Abflusstrends sind unterschiedlich, je nach verwendetem treibenden regionalen Klimamodell. In Abschnitt 2.8.2 sind dann noch ergänzend weitere Modellrechnungen dargestellt, wobei dort der Schwerpunkt auf der Darstellung der Wasserbilanz liegt.

2.5.2 Beobachtete Veränderungen im Mittelwasserabfluss

Auf Jahresbasis sind für den längeren Zeitraum 1951 bis 2000 die Trends in den Abflusshöhen nur schwach und statistisch kaum signifikant ausgeprägt (Fürst et al., 2008). Regional und saisonal betrachtet zeigen sich jedoch deutliche Unterschiede in der mittelfristigen Veränderung des Abflusses, wobei der Alpenhauptkamm eine klare Grenze bildet (Abbildung 2.13 und 2.14). Im Süden besteht ein fallender, im Alpenraum dominiert hingegen ein steigender Trend im Jahresabfluss.

Im saisonalen Verhalten sind ebenfalls deutliche regionale Unterschiede erkennbar. Im Winterhalbjahr stehen eindeutig positiven Abflusstrends (November bis April) nördlich des Alpenhauptkammes negative Trends im Süden gegenüber. Die Gebiete südlich des Alpenhauptkammes sind auch durch negative Trends in den Frühjahrs- und Sommermonaten geprägt. Die Signifikanz der Änderungen ist sowohl den Abbildungen 2.13 und 2.14 als auch Tabelle 2.2 zu entnehmen.

2.5.3 Zukünftige Veränderungen im Mittelwasserabfluss

Wie aus dem ENSEMBLES-Projekt (van der Linden und Mitchell, 2009) ersichtlich ist, liegt der Ostalpenraum in einer Übergangszone, für die nach Norden hin größere Niederschlagsmengen vorhergesagt werden, während diese nach Süden abnehmen (siehe dazu auch Abbildung 9 in Band 1, Kapitel 4). Veränderungen des Mittelwasserabflusses unter Klimawandelbedingungen hängen stark von den Klimaänderungssignalen und hier insbesondere von der Veränderung des Niederschlags im zugrunde liegenden Klimamodell ab. Eine ausführliche Diskussion der Robustheit bzw. der Unsicherheiten in den regionalen Klimaszenarien findet in Band 1, Kapitel 4 statt. Für die hydrologischen Abflussberechnungen wurden daher in diesem Kapitel verschiedene regionale Klimamodelle als Antrieb herangezogen.

In Nachtnebel et al. (2010a) wurden die korrigierten Daten des REMO-UBA-Modells (Déqué, 2007; Formayer, 2010; Formayer und Haas, 2010) mit einer räumlichen Auflösung von 10 km Rasterlänge und für drei Emissionsszena-

Tabelle 2.2 Prozent der Pegel mit steigenden und fallenden Trends der Abflüsse in Österreich. Erster Wert bezieht sich auf die Jahresmittel, Werte in Klammer auf die Vierteljahresabflüsse (DJF, MAM, JJA, SON). Entsprechend dem gewählten Signifikanzniveau sind Werte von 5 % und kleiner als zufällig anzusehen. Quelle: Blaschke et al. (2011)

Table 2.2 Percentage of gauging stations with increasing or falling trends in runoff in Austria. First figure refers to mean annual values, in brackets 4 seasonal values referring to DJF, MAM, JJA, SON. According to the chosen significance level all the values within a ± 5 % quantile are considered as insignificant. Source: Blaschke et al. (2011)

	1950–2007 (min. 45 Jahre)			1976–2007 (min. 25 Jahre)		
	Anteil der Pegel [%] mit			Anteil der Pegel [%] mit		
	steigendem Trend	nicht signif. Trend	fallendem Trend	steigendem Trend	nicht signif. Trend	fallendem Trend
Alle Gebiete in Österreich	9 (15 7 15 18)	68 (67 53 68 77)	23 (18 40 17 5)	9 (7 10 8 16)	81 (84 81 71 80)	10 (9 9 21 4)
Rhein, Donau und Elbegebiete	11 (17 7 19 22)	79 (77 57 62 76)	10 (6 36 19 2)	9 (7 11 9 15)	85 (85 87 72 82)	6 (8 2 19 3)
Drau, Mur und Raabgebiete	7 (13 7 10 8)	41 (44 44 77 79)	52 (43 49 13 13)	7 (7 7 4 19)	70 (80 64 69 74)	23 (13 29 27 7)

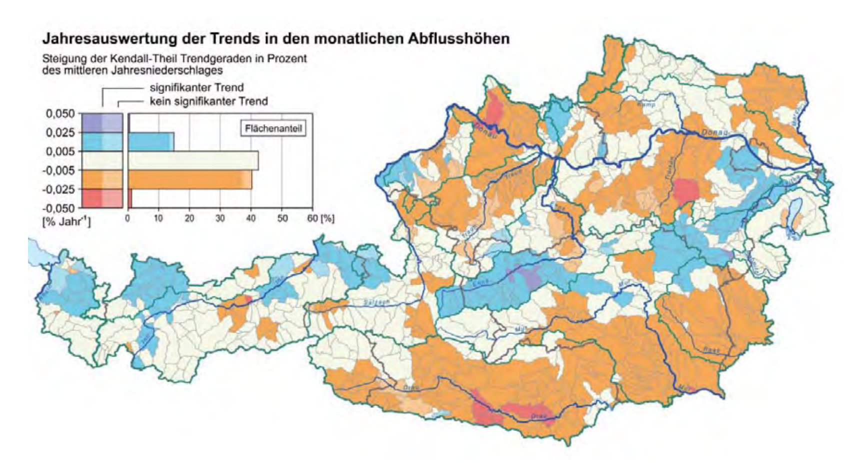
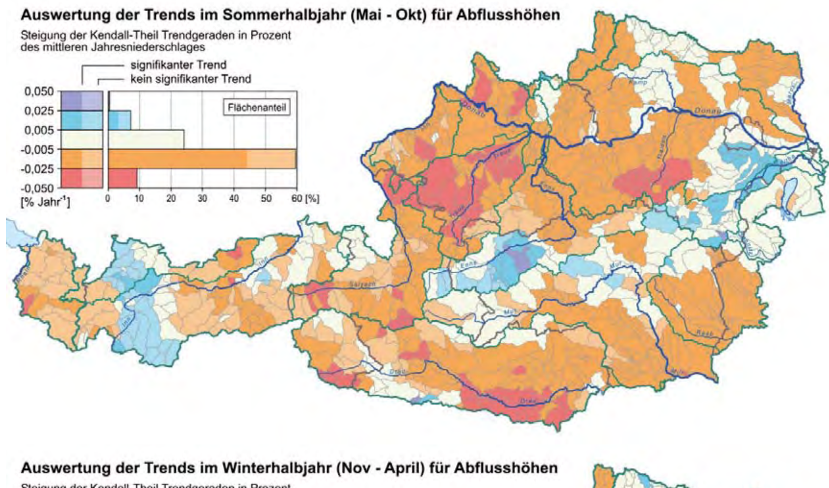


Abbildung 2.13 Veränderungen im Jahresabfluss im Zeitraum 1951–2000. Quelle: Fürst et al. (2008)

Figure 2.13 Observed changes in annual runoff in the period 1951–2000. Source: Fürst et al. (2008)



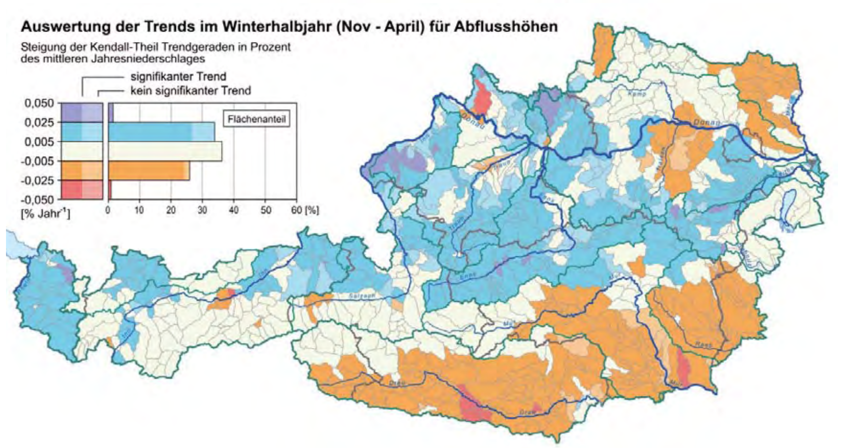


Abbildung 2.14 Veränderungen im Sommerabfluss (oben) und Winterabfluss (unten) im Zeitraum 1951–2000. Quelle: Fürst et al. (2008)

Figure 2.14 Observed changes in summer runoff (top) and winter runoff (below) in the period 1951–2000. Source: Fürst et al. (2008)

rien (A1B, A2, B1) verwendet. Unter Berücksichtigung der Geländehöhen wurden die Rasterwerte von Temperatur und Niederschlag auf ein 1 km-Raster interpoliert und als Input für das flächenverteilte hydrologisches Modell COSERO herangezogen (Nachtnebel und Fuchs, 2004; Eder et al., 2005; Kling, 2006). Als Modelloutput lieferten die Modelle dann Zeitreihen der Monatsabflüsse. Eine Überprüfung der simulierten Abflüsse wurde für die Referenzperiode 1961 bis 1990, teilweise bis zum Jahr 2005, in 188 Einzugsgebieten vorgenommen.

In den hydrologischen Modellsimulationen (Nachtnebel et al.; 2010a) werden bis zur Mitte des Jahrhunderts kleine Zunahmen im mittleren Abfluss für große Teile Österreichs ausgewiesen. Für den Westen und Süden werden leicht fallende Abflussmittel ausgewiesen. Bis zum Zeitraum 2061 bis 2090 beeinflussen dann weiterhin steigende Temperaturen den Was-

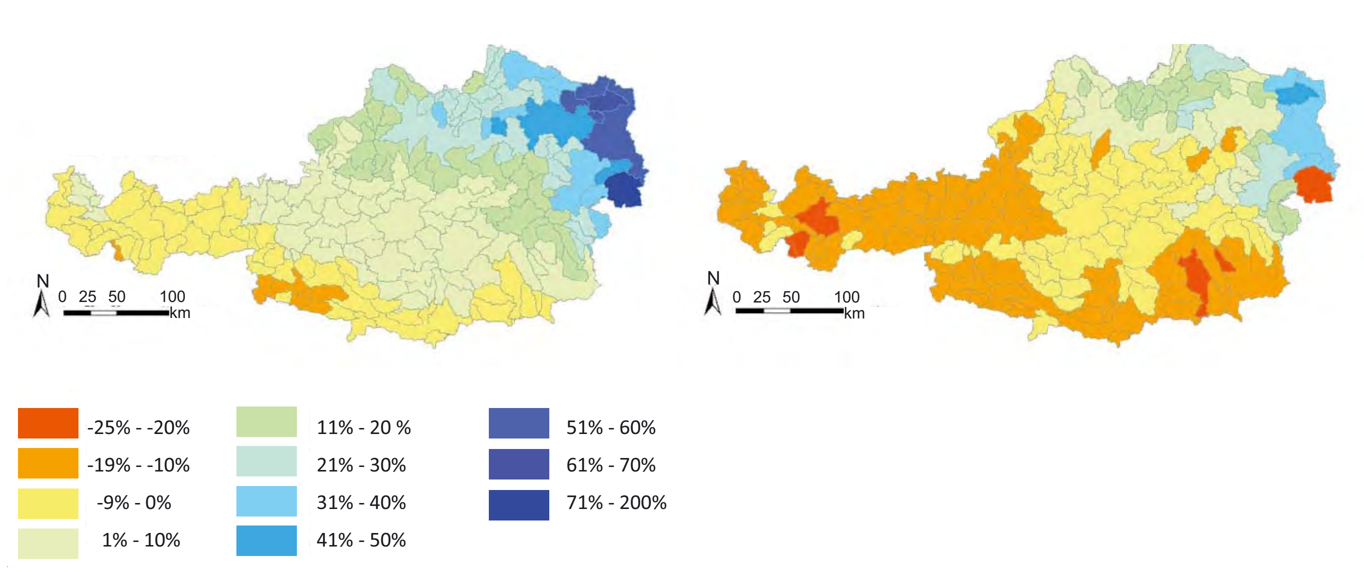


Abbildung 2.15 Prozentuelle Änderungen des mittleren Jahresabflusses (REMO-UBA, A1B Szenario). Links: Zeitraum 2036–2065 – Zeitraum 1961–1990; rechts: Zeitraum 2061–2090 – Zeitraum 1961–1990. Quelle: aus Nachtnebel et al. (2010a)

Figure 2.15 Changes in mean annual runoff (%) (REMO-UBA, A1B scenario). Left: period 2036–2065 – period 1961–1990; right: period 2061–2090 – period 1961–1990. Source: Nachtnebel et al. (2010a)

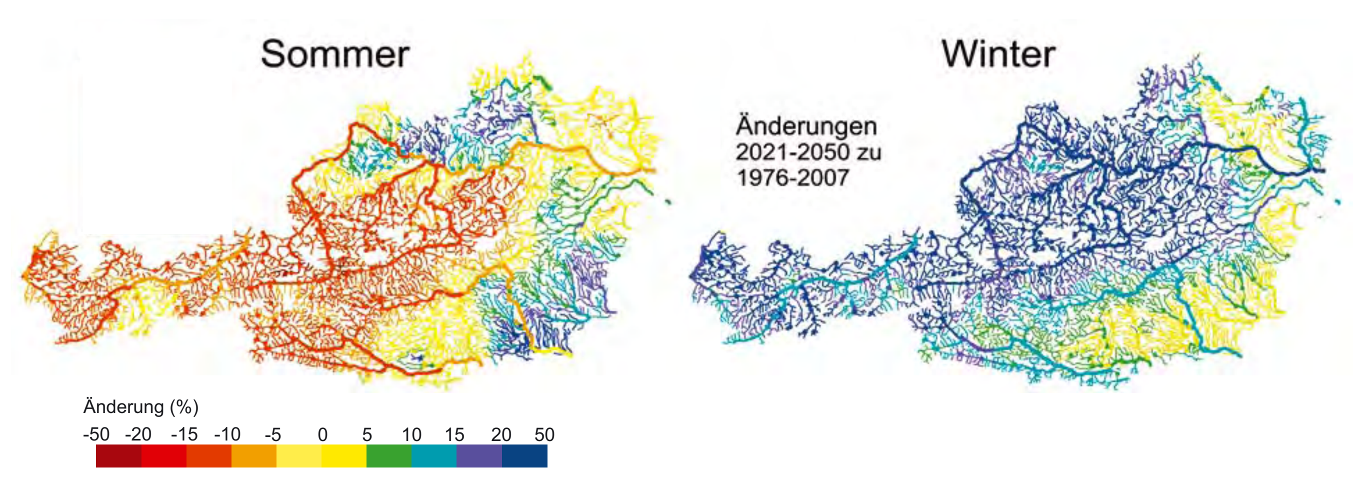


Abbildung 2.16 Prozentuelle Änderungen des Sommerabflusses (J, J, A) (links) und des Winterabflusses (D, J, F) (rechts) für den Zeitraum 2021–2050 verglichen mit dem Zeitraum 1976–2006. Das Klimaszenario CLM-ECHAM5-A1B wird als treibender Input eines Niederschlag-Abflussmodells herangezogen und jeweils mit der Periode 1976–2006 verglichen; blau: Zunahme, rot: Abnahme. Quelle: Blaschke et al. (2011)

Figure 2.16 Expected changes (%) in summer (J, J, A) (left) and winter runoff (D, J, F) (right) in the period 2021–2050 compared to 1976–2006. Driving climate model is CLM-ECHAM5-A1B compared to the period 1976–2006 and simulated by a rainfall runoff model; blue: increase, red: decrease. Source: Blaschke et al. (2011)

serhaushalt, sodass die Abflüsse überwiegend fallende Tendenz zeigen (Abbildung 2.15). Einzelne kleine Einzugsgebiete im Osten Österreichs (z. B. Seewinkel) zeigen starke prozentuelle Änderungen, was aber durch deren derzeit sehr geringen bis vernachlässigbaren Oberflächenabfluss erklärbar ist.

Blaschke et al. (2011) verwendeten eine ähnliche Methodik, wobei als Input das regionale Klimamodell CLM-ECHAM5 diente. Insgesamt sind die berechneten Änderungen des mittleren jährlichen Abflusses klein (Blaschke et al., 2011), wobei in einigen Regionen (Mühlviertel) eine leichte Zunahme von bis zu 10 % berechnet wird, was durch die im Klimamodell in diesem Gebiet simulierten größeren Niederschläge erklärt wird. Gegen Ende des 21. Jahrhunderts dominieren in allen Modellen der Temperaturanstieg und die damit erhöhte Verdunstung, sodass der Abfluss tendenziell rückläufig ist, insbesondere im Süden Österreichs.

Tabelle 2.3 Prozent der Pegel mit steigenden, nicht signifikanten und fallenden Trends der Jahreshochwässer in Österreich, sowie nördlich und südlich des Alpenhauptkammes. Der erste Wert bezieht sich auf Gebiete > 500 km², der zweiter Wert auf Gebiete < 500 km². Entsprechend dem gewählten Signifikanzniveau von 5 % sind Werte von 5 % und kleiner als insignifikant anzusehen. Quelle: Blöschl et al. (2011)

Table 2.3 Percentage of gauging stations with increasing, insignificant and decreasing trends in annual runoff maxima in Austria, north and south of the Alps. The first value refers to catchments larger than 500 km², the second one to catchments smaller than 500 km². All values within a confidence band of (<±5 %) are considered as insignificant. Source: Blöschl et al. (2011)

	1955 - 2007 (min. 40 Jahre)			1976 - 2007 (min. 25 Jahre)		
	Anteil d. Pegel [%] mit			Anteil d. Pegel [%] mit		
	steigendem Trend	nicht signif. Trend	fallendem Trend	steigendem Trend	nicht signif. Trend	fallendem Trend
Alle Gebiete in Österreich	7/17	86/75	7/8	12/22	81/74	7/4
Rhein, Donau und Elbegebiete	7/21	82/71	11/8	14/25	82/72	4/3
Drau, Mur und Raabgebiete	7/5	93/88	0/7	9/10	77/81	14/9

Im saisonalen Abflussverhalten (Abbildung 2.16) treten bei allen Modellen deutliche Klimaeffekte auf. Im Alpenraum werden durch die erhöhten Temperaturen die Winterabflüsse zunehmen, während im Sommer die Verdunstung stark dominiert, sodass die Sommerabflüsse generell abnehmen werden. Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass temperatur-induzierte Abflussänderungen (mehr Regen als Schnee, Verschiebung der Schneeschmelze, Gletscherspende) deutlich belastbarer sind als Abflussänderungen, die durch Niederschlagsveränderungen verursacht werden (Blaschke et al., 2011).

Generell weisen die Szenarienanalysen sehr große Unsicherheiten auf (Blöschl et al., 2007; Nachtnebel et al., 2010a; Blöschl und Montanari, 2010). Dies ist durch die unterschiedlichen Emissionsszenarien, die verschiedenen treibenden Klimamodelle, deren unterschiedliche räumliche Auflösung und durch die Modelldefizite selbst zu erklären. Die Unsicherheit zufolge hydrologischer Modelle bzw. durch Klimamodelle kann mittels Modelltests, Sensitivitätsanalysen und Ensemblesimulationen analysiert werden (z. B. Merz et al., 2011). Für Simulationen, die bis zum Ende des 21. Jahrhunderts reichen, nehmen die Unsicherheiten naturgemäß stark zu.

Um die Zuverlässigkeit in der Beurteilung der Klimaeinflüsse auf den Abfluss zu erhöhen, wurden in der ZAMG / TU-Wien Studie (BMLFUW, 2011) mehrere Methoden herangezogen, die sich in Hinblick auf Datengrundlage und Annahmen unterscheiden. Neben den zwei üblichen Ansätzen, CLM-ECHAM5 basierte Trendanalysen und Szenarienanalysen, die sich wesentlich in Hinblick auf Daten und Modellannahmen unterscheiden, wurden ergänzend zwei weitere Methoden angewandt. Die erste basiert auf einer Analyse der zeitlichen Variabilität der Daten (Sensitivitätsanalyse oder Elastizitätsmethode) und die zweite, die „Trading space for time"-Methode, analysiert die räumliche Variabilität der Daten. Ein Vergleich der Ergebnisse aus verschiedenen methodischen Ansätzen ist in Abbildung 2.17 dargestellt.

Beim Vergleich der auf unterschiedlichen Methoden beruhenden Ergebnisse ist festzustellen, dass für die Periode 2021 bis 2050 tendenziell eine Abnahme der Mittelwasserführung im Süden und wahrscheinlich auch im Südosten zu erwarten ist. Im Norden (Mühl- und Waldviertel) ist von einer leichten Zunahme auszugehen. Die Veränderungen in den alpinen Gebieten sind mit hohen Unsicherheiten behaftet.

2.5.4 Beobachtete Veränderungen im Hochwassergeschehen

Auf Basis des im Projekt HORA (Hochwasserrisikozonierung-Austria) erstellten Datensatzes von Hochwasserdurchflüssen in Österreich (Merz et al., 2008; Rogger et al., 2011) wurden in der ZAMG / TU-Wien Studie (BMLFUW, 2011) Trendanalysen durchgeführt (Tabelle 2.3). Wie von Parajka et al. (2009, 2010) dargestellt, sind nicht nur die Änderungen der Hochwasserdurchflüsse ein wichtiger Indikator von Klimaeinflüssen auf das Hochwasserregime, sondern auch die auslösenden Prozesse bzw. die Jahreszeit, in der sie auftreten.

Für Österreich ist zusammenfassend festzustellen (BMLFUW, 2011), dass in den letzten 30 Jahren in etwa 20 % der Einzugsgebiete die Hochwässer zugenommen haben, besonders in kleinen Gebieten nördlich des Alpenhauptkamms. Österreichweit haben die Winterhochwässer deutlich stärker zugenommen als die Sommerhochwässer. In nahezu keinem

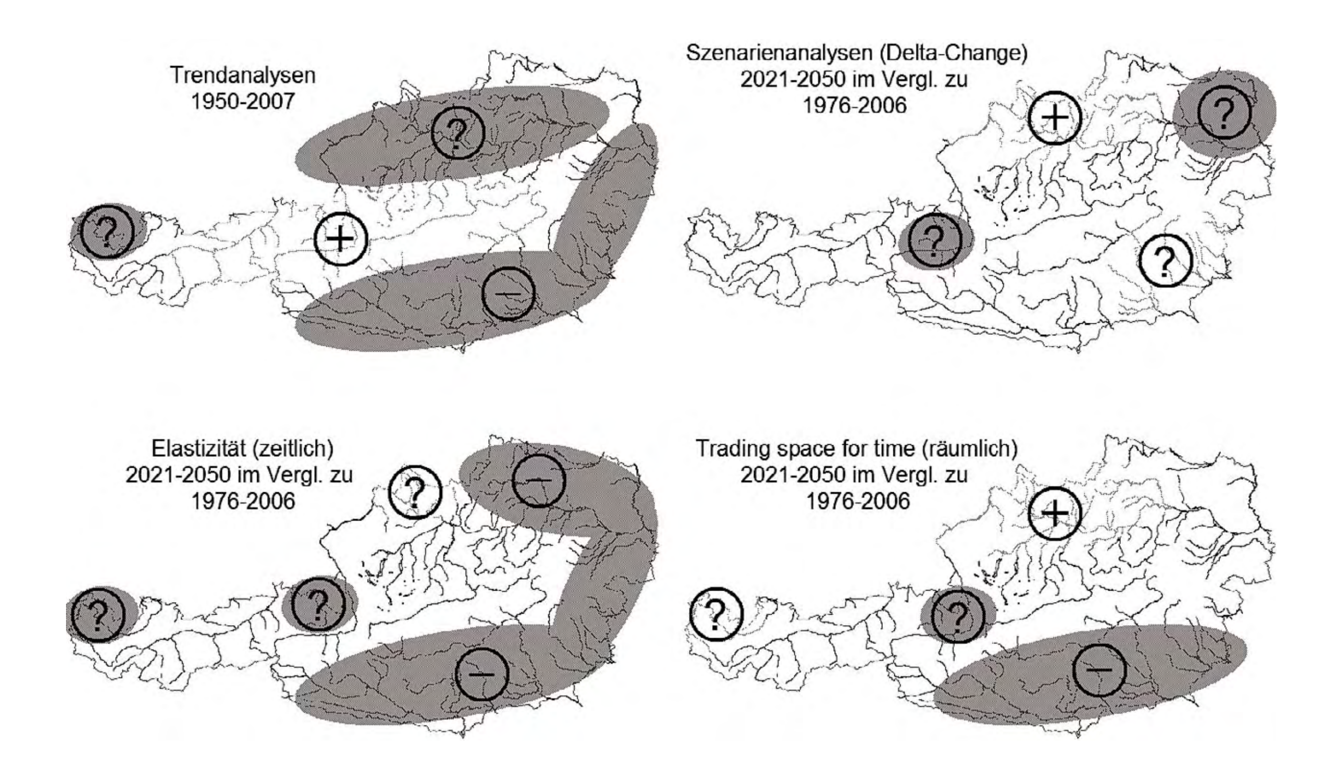


Abbildung 2.17 Vergleich der Trends im mittleren jährlichen Abfluss der Periode 2021–2050 mit 1976–2006 nach vier Methoden. Treibendes Modell ist das Szenario CLM-ECHAM5-A1B. Quelle: Blaschke et al. (2011)

Figure 2.17 Comparison of mean annual runoff trends in the period 2021–2050 with 1976–2006 based on four different approaches. Driving climate model is the CLM-ECHAM5-A1B. Source: Blaschke et al. (2011)

Gebiet haben in diesem Zeitraum die Hochwässer abgenommen.

Bei Auswertung eines etwas längeren Zeitraums, wie über die letzten 50 Jahre, ist der Trend aber weniger deutlich ausgeprägt. Die Trends über die letzten 100–150 Jahre zeigen, dass in manchen großen Einzugsgebieten (z. B. der Donau) die kleinen Hochwässer zugenommen haben, jedoch nicht die großen Hochwässer.

Die Häufung der Hochwässer in den letzten Jahrzehnten liegt im Rahmen der natürlichen Variabilität von Hochwasserdekaden, aber auch ein Einfluss einer Klimaänderung ist nicht auszuschließen.

Die hochwasserauslösenden Prozesse in Österreich unterscheiden sich je nach der Region. Die Größe der Hochwässer wird durch das Wechselspiel der Saisonalität von Niederschlag, Schnee und Abflussbereitschaft bestimmt. Ihre Entstehungsmechanismen wurden nach fünf Typen klassifiziert:

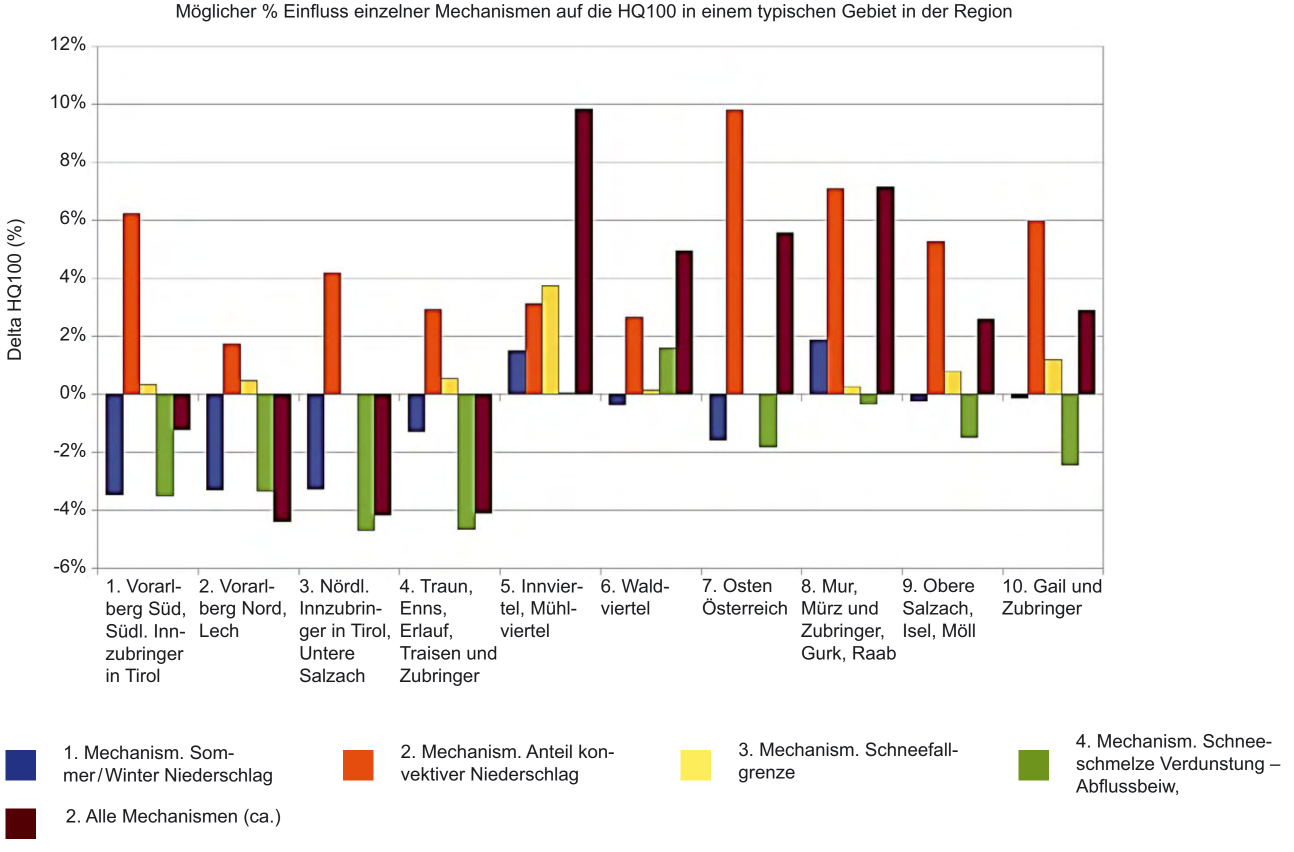
- Hochwässer zufolge langer Niederschläge,
- Hochwässer zufolge kurzer Niederschläge,
- Hochwässer aufgrund von Gewittern,
- Regen-auf-Schnee-Ereignisse und
- Schneeschmelzhochwässer (siehe dazu auch Abbildung 2.18).

43 % aller untersuchten Jahreshöchsthochwässer waren Hochwässer zufolge langer Niederschläge, nur 3 % waren Schneeschmelzhochwässer.

2.5.5 Zukünftige Veränderungen im Hochwassergeschehen

Prognosen über Hochwasseränderungen sind nach dem derzeitigen Kenntnisstand nicht möglich, da die zukünftige Entwicklung der Extremwerte des Klimas, insbesondere des Niederschlags, nicht ausreichend zuverlässig berechnet werden kann.

In der ZAMG / TU Wien Studie (BMLFUW, 2011) wurden die oben angeführten Mechanismen für mögliche Änderungen der Hochwasserentstehung und ihrer Saisonalität herangezogen und nach den Typen analysiert. Dadurch können Unsicherheiten getrennt nach den Mechanismen und ihrer Saisonalität ausgewiesen werden. Die Wenn-Dann-Szenarien



Abdruck mit freundlicher Genehmigung von Springer Science+Business Media: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, Auswirkungen des Klimawandels auf Hochwasser und Niederwasser, Band 63 (1-2), 2011, S. 26, G. Blöschl, A.Viglione, R. Merz, J. Parajka, J. L. Salinas, W., Schöner, Abb. 5

Abbildung 2.18 Wenn-Dann-Szenarien für das HQ_{100} bei bestimmten Annahmen der Änderungen der hochwasserauslösenden Prozesse (2021–2050 im Vergleich zu 1976–2007). Quelle: Blöschl et al. (2011)

Figure 2.18 If-then scenarios to analyse changes of HQ_{100} runoff under assumption of changes in flood generating processes. Comparison of the period 2021–2050 with 1976–2007. Source: Blöschl et al. (2011)

(Zeithorizont 2021 bis 2050 im Vergleich zu 1976 bis 2007) der Studie wurden mittels des Modells von Sivapalan et al. (2005) durchgeführt.

Insgesamt ergibt sich folgendes Bild: es sind erhöhte konvektive Niederschläge von +2 bis +10 % möglich und eine Verschiebung des Zeitpunktes der Hochwässer in Richtung früher Frühjahrshochwasser und mehr Winterhochwässer ist zu erwarten. Im Inn-, im Mühl- und im Waldviertel kann eine gewisse Verschiebung der Hochwässer vom Sommer in den Winter mit steigenden Lufttemperaturen in Zusammenhang gebracht werden, weshalb eine Überprüfung der Bemessungswerte notwendig sein kann.

Abbildung 2.18 stellt die Ergebnisse der Wenn-Dann-Szenarien grafisch dar. Der erste Balken von links in blau zeigt beispielsweise, dass infolge einer Verschiebung von Sommer- und Winterniederschlägen eine Reduktion von 3 % des HQ_{100}-Abflusswertes (ein Extremereignis mit einem durchschnittlichen Wiederkehrsintervall von 100 Jahren) für den Zeitraum 2021 bis 2050 im Vergleich zu 1976 bis 2007 zu erwarten ist. Rot, grün und gelb entsprechen den anderen die Hochwässer verändernden Mechanismen und dunkelbraun beinhaltet alle Mechanismen.

Besonders in kleinen Gebieten ist die Unsicherheit von Bemessungswerten im derzeitigen Klima wesentlich größer als die hier diskutierten Änderungen aufgrund des Klimawandels. Bei der Bestimmung von Bemessungswerten des Hochwassers (Blöschl und Merz, 2008) ist deshalb die Unsicherheit durch Verwendung einer möglichst weitreichenden Datenbasis zu reduzieren, die über das Hochwasserkollektiv hinausgeht (Salinas et al., 2011; Blöschl et al., 2012).

Um Veränderungen im Hochwassergeschehen zu erfassen, wurden ergänzend Szenarien mit Niederschlags-Abflussmodellen angewandt (Nachtnebel et al., 1999; Nachtnebel und Fuchs, 2004; Nachtnebel et al., 2010c; Holzmann et al., 2010; Holzmann und Koboltschnig, 2010) sowie der Zusammenhang zwischen großräumigen Druckmustern über Mittel-

Tabelle 2.4 Prozent der Pegel mit steigenden und fallenden Trends der Niederwasserdurchflüsse Q_{95} in Österreich. h ist die mittlere Einzugsgebietshöhe. Nur die unbeeinflussten bzw. gering beeinflussten Pegel sind ausgezählt. Quelle: Blöschl et al. (2011)

Table 2.4 Percentage of gauging stations with increasing, insignificant (± 5 %) and decreasing trends in Q_{95} low flow quantiles. h mean sea level of catchment. Only undisturbed gauging stations are considered. Source: Blöschl et al. (2011)

	1950–2007 (min. 45 Jahre)			1976–2007 (min. 25 Jahre)		
	Anteil der Pegel [%] mit			Anteil der Pegel [%] mit		
	steigendem Trend	nicht signif. Trend	fallendem Trend	steigendem Trend	nicht signif. Trend	fallendem Trend
Alle Gebiete in Österreich	19	73	8	8	85	7
Gebiete mit h < 900 m	5	82	13	5	84	11
Gebiete mit h > 900m	34	58	8	14	83	3

europa mit dem Auftreten von Abflussextremen statistisch analysiert (Nachtnebel et al., 2010c). Die Analysen ergaben im Vergleich zur Kontrollperiode 1961 bis 1990 keine Veränderungen in der Häufigkeit des Auftretens von Hochwasser auslösenden Druckmustern über dem Alpenraum. Allerdings wurden auf Basis der Wetterlagenklassifikation WLK733 (Philipp et al., 2010) für den Winter und Frühling ein häufigeres Auftreten jener Wetterlagen prognostiziert, die in den Klimaregionen im Norden und Westen Österreichs in diesen Jahreszeiten Hochwasserereignisse auslösen.

Auch in Bezug auf die 3-tägigen Niederschlagsereignisse zeigen die Trends der Wetterlagen weder eine deutlich positive noch negative Änderung in der Zukunft. In den Wintermonaten könnte in den Regionen Inneralpin, West und Nord eine Zunahme der 3-tägigen Extremniederschläge erfolgen (Nachtnebel et al., 2010c). Für die übrigen Jahreszeiten kann keine Tendenz abgelesen werden.

2.5.6 Beobachtete Veränderungen im Niederwasser

In den alpinen Gebieten Österreichs treten häufig Winterniederwässer als Folge von Schnee bzw. Gefrierprozessen auf. Im östlichen Flachland dominieren Sommerniederwässer zufolge hoher Verdunstung und längerer Trockenphasen. Niederwässer können durch die Marke Q_{95} gekennzeichnet werden, eine Marke, die mit 5 % Wahrscheinlichkeit noch unterschritten werden kann. Über 900 m Seehöhe haben im Zeitraum 1976–2007 in 14 % der Pegeleinzugsgebiete die Niederwasserabflüsse (Q_{95}) zugenommen und in nur 3 % der Gebiete abgenommen. Unter 900 m Seehöhe haben im gleichen Zeitraum in 10 % der Pegeleinzugsgebiete die Niederwasserabflüsse (Q_{95}) abgenommen und in nur 5 % der Gebiete zugenommen (Tabelle 2.4). Eine Abnahme ist insbesondere im Süden und Südosten Österreichs festzustellen (BMLFUW, 2011).

2.5.7 Zukünftige Veränderungen im Niederwasser

In den Alpen Österreichs (hochgelegene Gebiete bzw. Winterniederwasserregime) zeigen die Berechnungen bei Verwendung verschiedener Klimaszenarien für den Zeitraum 2021 bis 2050 im Vergleich zu 1976 bis 2006 eine deutliche Zunahme der Abflüsse bei Niederwasser. Die Zunahme beträgt etwa 10–25 %. In den tiefer gelegenen Gebieten (< 900 m) sowie im Alpenvorland geben die Szenarienrechnungen differenzierte Ergebnisse: in manchen Einzugsgebieten wird eine leichte Zunahme des Abflusses berechnet (z. B. Mühlviertel), in anderen Gebieten wird eine Abnahme des Abflusses von etwa 10–15 % bei Niederwasser ermittelt (z. B. Weinviertel, Nördliches Burgenland, Teile der Südsteiermark, Teile des niederösterreichischen Alpenvorlands). Die Abnahme der Abflüsse bei Niederwasser im Osten betrifft alle Jahreszeiten, die Zunahme der Abflüsse bei Niederwasser im Westen hingegen den Winter und das Frühjahr. Generell ist zu erwarten, dass sich der Trend abnehmender Niederwasserabflüsse im Osten mit bis zu 10–15 % für den Zeithorizont 2021 bis 2050 im Vergleich zu 1976 bis 2007 fortsetzen wird.

Hauptsächlich für den alpinen Raum eignet sich das Niederwasserjahr 2003 sehr gut für die Beurteilung von Niederwassersituationen bei Klimaänderung im Sommer, da dies ein extremes Jahr war, wie es auch in Zukunft häufiger auftreten kann (BMLFUW, 2011; Blöschl et al., 2011; Habersack et al., 2006).

Weitere Ergebnisse zur Veränderung der Abflusssituation in Niederwasserphasen sind in Abschnitt 2.8.6 (Tabelle 2.6) zu finden.

2.5.8 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen zum Abflussverhalten

Tendenziell zeigen die Jahresmittel der Abflüsse zwischen 1951 und 2000 in vielen Einzugsgebieten eine leicht fallende Tendenz. Insbesondere südlich des Alpenhauptkamms ist dieses Verhalten ausgeprägt. Weiters weist der Abfluss eine deutliche, durch den Alpenraum geprägte, Saisonalität auf.

Allein durch die weiter steigenden Temperaturen und die damit einhergehende Verdunstungszunahme wird die Jahresabflussfracht tendenziell abnehmen, wobei der Süden stärker betroffen sein dürfte. Wieweit dies durch Änderungen im Niederschlag kompensiert oder verstärkt wird, ist mit großen Unsicherheiten behaftet, da der Ostalpenraum in den Klimamodellen in einer Übergangszone von abnehmenden Niederschlägen im Süden zu zunehmenden Niederschlägen im Norden liegt.

Durch die Zunahme der Temperatur werden auch die Winterabflüsse steigen, während jene im Sommer, insbesondere im Flachland, abnehmen dürften. Die Schneeschmelze setzt zunehmend früher ein. Insgesamt ist der Abflussbeitrag der Gletscher gering, doch in alpinen Gewässern kann er in heißen Sommern bedeutend sein. Etwa ab der Mitte des 21. Jahrhunderts – es liegen dazu unterschiedliche Aussagen vor – sind nur mehr kleine vergletscherte Flächen vorhanden, sodass deren Schmelzabfluss deutlich zurückgehen wird.

Die Projektionen ergeben, dass die Häufigkeit der Winterniederwässer im Alpenraum abnehmen wird (der Abfluss nimmt zu), während in den Flachlandgebieten im Süd-Osten eine Verschärfung der Niederwassersituation zu erwarten ist. Bezüglich der Veränderungen im Hochwasserabfluss sind die Aussagen sehr unsicher. Im Zeitraum 1976–2007 haben in etwa 20 % der Einzugsgebiete in Österreich die Hochwässer zugenommen, besonders in kleinen Gebieten nördlich des Alpenhauptkammes. Die Trends in der Periode 1951–2007 sind weniger deutlich. Österreich weit haben die Winterhochwässer deutlich stärker zugenommen als die Sommerhochwässer. Szenarien und Modellanalysen zeigen, dass in einigen Gebieten im Norden (Mühl- und Waldviertel) eine Tendenz zum verstärkten Auftritt von Winterhochwässern besteht.

2.6 Limnische Systeme
2.6 Limnic systems

2.6.1 Einleitung

Der Schwerpunkt liegt hier auf der Darstellung der Veränderungen im Energie- und Stoffhaushalt von Seen und Fließgewässern. Bis etwa Mitte des 20. Jahrhunderts waren Verschlechterungen vieler Gewässer durch Verunreinigungen und Nährstoffanreicherung, wie z. B. durch Phosphorverbindungen, (Eutrophierung) zu beobachten (Löffler, 1977; Fricker, 1980; Anonymus, 1983). Mitte der 1960er Jahre war die Gewässerverschmutzung so weit fortgeschritten, dass Maßnahmen unerlässlich wurden (Liepolt, 1957, 1965). So entstand am Zellersee eine der ersten Ringkanalisationen (Liepolt, 1967) und am Mondsee die erste Kläranlage mit Phosphatfällung (Gaigg, 1979). Mit dem Ausbau der Kläranlagen und Kanalisationen – und damit einer wesentlichen Reduktion der Nährstoffzufuhr – begannen sich die Seen zu erholen. Langzeitdaten aus den beiden großen Seengebieten nördlich und südlich der Alpen lassen diese Entwicklung deutlich erkennen (Dokulil und Teubner, 2005; Sampl et al., 2008). Ähnliches gilt auch für die österreichischen Fließgewässer, wie z. B. die Donau (Kavka et al., 2000). Die Periode der Rückführung der Gewässer in einen nährstoffarmen Zustand, die sogenannte (Re)-Oligotrophierung österreichischer und europäischer Seen und Fließgewässer, ist in Dokulil et al. (2000), Jeppesen et al. (2005) und Chorus et al. (2011) dokumentiert.

Diese positiven Entwicklungen sind zu relativieren (Eisenreich et al., 2005), da es durch die Klimaerwärmung zu einer klimainduzierten Eutrophierung kommen kann (Dokulil und Teubner, 2011). Die Perioden der Eutrophierung, sowie die nachfolgenden Verbesserungen, stellen gerichtete Veränderungen (Trends) dar, welche allerdings die klimatischen Einflüsse auf die Gewässer verschleiern bzw. gezielte Analysen erschweren.

Generell gilt, dass physikalische Parameter (z. B. Gewässertemperaturen) am besten mit Klimaeinwirkungen korrespondieren, chemische weit weniger und biologische mehr indirekt (Dokulil et al., 2010; Dokulil und Teubner, 2002). Dies ist dadurch begründet, dass Nährstoffkonzentrationen und biologische Parameter stärker von lokalen Gegebenheiten geprägt sind. Daher sind auch Aussagen über physikalische Faktoren am zuverlässigsten, biologische Komponenten hingegen lassen sich nur sehr eingeschränkt vorhersagen.

2.6.2 Zusammenhänge zwischen Klima und Gewässern

Die Temperatur in Oberflächengewässern wird weitgehend von der Lufttemperatur und deren Veränderungen gesteuert. Diese sogenannte „Luft-Wasser-Koppelung" ist seit langem bekannt und gilt sowohl für stehende als auch für fließende Gewässer aller Höhenlagen (Hofstetter, 1954; McCombie, 1959; Shuter et al., 1983; Webb und Nobilis, 1999). Die sommerlichen Oberflächenwassertemperaturen geographisch weit auseinander liegender Seen weisen einen deutlichen Zusammenhang untereinander und mit der Lufttemperatur auf (Livingstone et al., 2010a,b). Mit der Höhenlage nehmen die Wassertemperaturen ab, was sich aus den Lufttemperaturen vorhersagen lässt (Livingstone et al., 1999; Livingstone et al., 2005). Zwischen Oberflächentemperatur und dem Klima bzw. synoptischen Klimaindikatoren, wie z. B. der Nordatlantischen Oszillation (NAO), bestehen deutliche Zusammenhänge, die über Lufttemperatur und Niederschlag gesteuert werden wie u. a. Livingstone und Dokulil (2001) nachgewiesen haben. Der Einfluss des Klimas betrifft aber auch die Wassertemperatur in der Tiefe von Seen (Livingstone, 1993, 1997; Dokulil et al., 2006a,b). Die Erneuerung des Tiefenwassers und die Regeneration des Sauerstoffgehalts in der Tiefe werden durch das Ausmaß der Vertikalzirkulation / Konvektion, die Einschichtung von Flusswasser und einströmendes kaltes Oberflächenwasser aus flachen Randbereichen bestimmt. Alle diese Prozesse sind stark abhängig von der Temperatur. Winterliche Erwärmung durch Veränderungen im Klima haben daher komplexe Wirkungen auf die physikalischen und chemischen Prozesse im See (z. B. Straile et al., 2003).

Die ökologischen Auswirkungen thermischer Gewässerbeeinflussung sind ausführlich beschrieben (Humpesch et al., 1982; Herzig et al., 1989; Dokulil et al., 1993). Klimabedingte Veränderungen wirken auf das pflanzliche und tierische Plankton (Straile und Adrian, 2000) und letztlich auch auf den Fischbestand (Straile et al., 2006). Dabei kommt es zu zeitlichen Verschiebungen des Klarwasserstadiums im Frühjahr mit Wirkung auf das Nahrungsnetz (Straile, 2002). Extremereignisse, wie etwa besonders warme Jahre, greifen ganz besonders in das empfindliche Ökosystem See ein (Jankowski et al., 2006). Eine Zusammenfassung und Übersicht über die Auswirkungen und Folgen einer Veränderung des Klimas auf Seen in Mitteleuropa geben Dokulil et al. (2010).

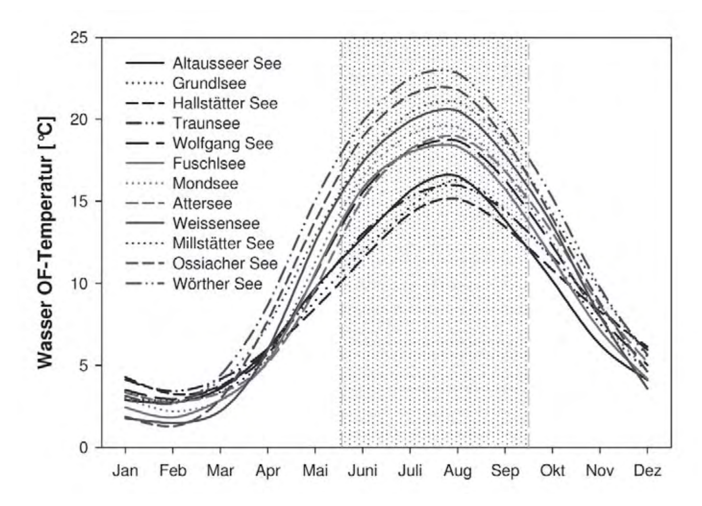


Abbildung 2.19 Mittlere Jahreskurven der Wassertemperatur an der Oberfläche (OF) von 12 Seen. Die Badesaison (Juni bis September) ist schattiert hinterlegt. Quelle: Dokulil (2014)

Figure 2.19 Mean monthly surface water temperatures of twelve Austrian lakes. The bathing season (June–September) is indicated by the shaded area. Source: Dokulil (2014)

2.6.3 Beobachtete Veränderungen in den Seen

Im folgenden Abschnitt werden die möglichen Auswirkungen veränderter Temperaturverhältnisse auf Gewässer analysiert und dargestellt. Grundlage bilden die umfangreichen Langzeitdaten der Hydrographischen Jahrbücher, Erfahrungen aus zwei EU-Klimaprojekten (REFLECT, CLIME) sowie eine Studie im Auftrag der Bundesforste über die Entwicklung der Temperaturen an der Oberfläche von Badeseen bis 2050 (Dokulil, 2009). Die Temperaturdaten reichen bei vielen Seen ein Jahrhundert zurück.

Die aus den Langzeitdaten abgeleiteten mittleren Jahresverläufe der Oberflächentemperaturen ausgewählter Seen sind in Abbildung 2.19 dargestellt. Es bestehen ausgeprägte regionale Unterschiede in der langfristigen Entwicklung der Oberflächentemperatur der Seen: während z. B. die Temperatur im Mondsee einen langfristig steigenden Trend aufweist, sind im Millstätter See auch Phasen (1950 bis 1975) einer Temperaturabnahme festzustellen, ehe dann ein deutlicher Anstieg eintritt (Dokulil, 2009). Die Gewässer werden in drei Gruppen unterteilt:

- Eine Gruppe bilden die Seen im Einzugsgebiet der Traun mit den niedrigsten sommerlichen Wassertemperaturen. Eine Ausnahme bildet der Wolfgangsee, der aufgrund seiner höheren Temperatur der zweiten Gruppe zugerechnet werden muss.

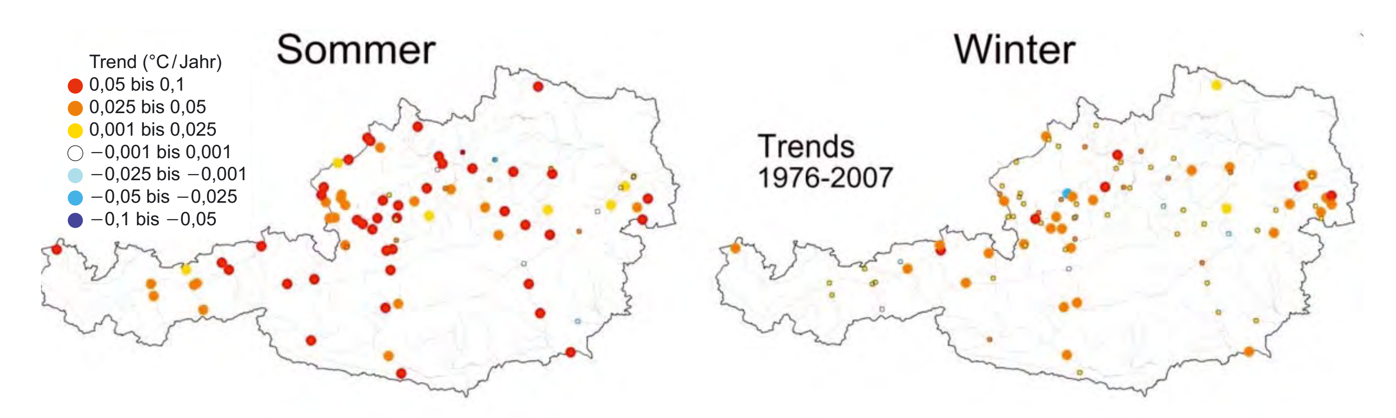


Abbildung 2.20 Trends der mittleren Fließgewässertemperaturen (J, J, A und D, J, F) für die Periode 1976–2007. Kleine Kreise: Trends nicht signifikant (5 % Signifikanzniveau). Große Kreise blau: fallende Trends, Große Kreise rot: steigende Trends. Quelle: BMLFUW (2011)

Figure 2.20 Observed trends of the water temperature of rivers for the period 1976–2007. Left: summer (J, J, A); Right: winter (D, J, F). Small circles. Insignificant trend; large circles: significant trends; blue: decreasing, red: increasing. Source: BMLFUW (2011)

- Deutlich höhere Temperaturen weisen die Seen im Einzugsgebiet der Ager in der Badesaison auf, die zusammen mit dem Wolfgangsee die zweite Seengruppe bilden.
- Am wärmsten sind im Sommer die Seen in Kärnten, deren Oberflächentemperaturen mit abnehmender Höhenlage zunehmen (Abbildung 2.21).

Eine Varianzanalyse der drei Gruppen zeigt, dass sich die Oberflächentemperaturen der Seen in den drei Gruppen statistisch signifikant ($P \leq 0{,}001$) voneinander unterscheiden. Ein Vergleich der Langzeitmittelwerte (1960 bis 1989) der Wassertemperaturen der drei Gruppen mit den entsprechenden Mittelwerten der Jahre 2001 bis 2005 zeigt eine statistisch signifikante Erhöhung der Wassertemperaturen seit der Jahrtausendwende. Der Anstieg der Seetemperatur im Zeitfenster 2001 bis 2005 beträgt relativ zum langjährigen Mittel im Einzugsgebiet der Traun 0,9 °C. Im Agergebiet ist der Anstieg mit 1,7 °C am größten und macht in den Kärntner Seen durchschnittlich 1,3 °C aus. Die stärksten Änderungen der Gewässertemperaturen treten im Frühjahr und Sommer auf. Bezüglich des Neusiedler Sees wird auf Band 1 Kapitel 5 verwiesen.

2.6.4 Beobachtete thermische Veränderungen in den Fließgewässern

Bereits in der Vergangenheit konnte ein genereller Anstieg der Wassertemperaturen verzeichnet werden (Abbildung 2.20 bis 2.22). Seit den 1980er Jahren betrug der Anstieg der Wassertemperaturen in Österreichs Flüssen ca. 1,5 °C im Sommer bzw. 0,7 °C im Winter, wobei diese Angaben sich auf den Mittelwert über alle Messstellen beziehen. Eine Auswertung aller Pegelstellen des Hydrographischen Dienstes mit mindestens 30 Jahren Temperaturbeobachtung bestätigt für die Fließgewässer eine deutliche Erwärmung (Abbildung 2.20).

Ob die Wassertemperatur der Donau steigt, ist umstritten. Laut Pekarova et al. (2008) steigen die Temperaturen bei Bratislava nur geringfügig. Hingegen fanden Webb und Nobilis (1995, 2007) signifikante Änderungen der Wassertemperatur der österreichischen Donau. Analysen des österreichischen Donauabschnittes weisen bei Hainburg von 1900 bis 2010 auf einen Anstieg der mittleren Jahrestemperatur von 9,1 auf 10,7 °C hin (Abbildung 2.22). Generell ist zu beachten, dass anthropogene Einwirkungen, wie Kühlwassereinleitungen und Kläranlagenabläufe, ebenfalls zur Temperaturerhöhung der Fließgewässer beitragen.

2.6.5 Zukünftige thermische Veränderungen in den Gewässern

Szenarien zukünftiger Einflüsse des veränderten Klimas (Persson et al., 2005) lassen eine kürzere Eisbedeckung (Livingstone et al., 2010b), einen früheren Beginn sowie eine längere Dauer der thermischen Schichtung und höhere sommerliche Wassertemperaturen in allen Tiefen in den stehenden Gewässern erwarten (Livingstone und Dokulil, 2001; Dokulil et al., 2006b). Bei Flachseen, wie z. B. dem Neusiedler See, kann die Erwärmung auch zu markanten Veränderungen des Wasserstands führen (Kromp-Kolb et al., 2005; Eitzinger et al., 2006). Aus Abbildung 2.21 und 2.22 lassen sich Temperaturen für 2050 extrapolieren, die für alle Badeseen in Abbildung 2.21 den gegenwärtigen 5-Jahres-Mittelwerten gegenübergestellt sind. Die prognostizierten Erhöhungen der Wassertemperatur sind in den Regionen unterschiedlich. Mit 1,2 bzw. 1,6 °C fällt

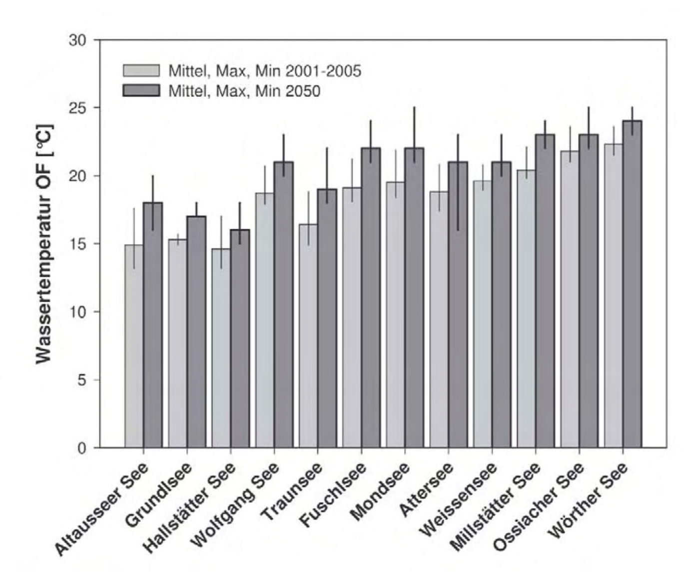


Abbildung 2.21 Mittlere Oberflächenwassertemperaturen der Seen in der Badesaison (J, J, A, S). Mittel, Maximum und Minimum im Zeitraum 2001–2005 und die aus dem linearen Trend der Zeitreihen errechneten Wassertemperaturen für 2050. Quelle: Dokulil (2009)

Figure 2.21 Mean values of measured surface water temperatures in lakes during swimming season (J, J, A, S). Mean, maximum and minimum values between 2001 and 2005 and estimates for 2050 based on a linear trend. Source: Dokulil (2009)

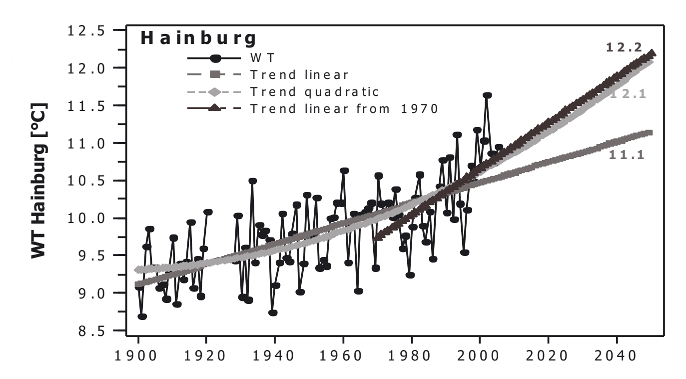


Abbildung 2.22 Wassertemperaturen in der Donau bei Hainburg. Zeitreihe der Beobachtungen; linearere Trends ab 1900 und 1970 und quadratischer Trend ab 1900, Schätzwerte der Temperatur für 2050. Quelle: Dokulil und Donabaum (2014)

Figure 2.22 Water temperatures of the Danube at Hainburg. Observed time series; linear trends since 1900 and 1970 and quadratic trend since 1900; estimates of temperature for 2050. Source: Dokulil und Donabaum (2014)

die Steigerung der Wassertemperatur an der Oberfläche im Altausseer See und im Grundlsee am geringsten aus (Dokulil, 2009). Alle übrigen Seen des Salzkammergutes werden sich um etwa 2,2–2,6 °C erwärmen, wobei die geringste Steigerung im Attersee zu erwarten sein wird. Dies ist eine Folge des großen Wasservolumens des Sees und der damit verbundenen langsameren Erwärmung. Es fällt auf, dass die Seen in Kärnten mit 1,2–2,1 °C geringere Temperaturerhöhungen aufweisen als die meisten Seen des Salzkammergutes. Die stärkste Erwärmung wird für den Millstätter See prognostiziert, die geringste für den Ossiacher See. Die hier vorgestellten Prognosewerte für 2050 unterscheiden sind nicht statistisch signifikant von Werten, welche mit einer unabhängigen Methode (Dokulil, 2009) für 2050 auf der Basis realistischer Klimaprognosen (George et al., 2010) errechnet wurden.

Analysen der Flusstemperaturen im österreichischen Donauabschnitt von Dokulil und Donabaum (2014) (Abbildung 2.22) weisen bei Hainburg bis 2050 je nach Prognosemodell auf einen Anstieg der mittleren jährlichen Wassertemperatur von 11,1 bis 12,2 °C hin.

2.6.6 Zusammenfassung limnische Systeme

Mängel in der Aussagekraft der zu erwartenden Veränderungen bestehen in der inter- und transdisziplinären Betrachtung bzw. Vernetzung einzelner Fachgebiete. So sollten etwa die Ergebnisse regionaler Klimavorhersagen mit den entsprechenden hydrologischen und limnologischen Erkenntnissen zusammengeführt werden, um so zu einer ganzheitlichen Betrachtung zu führen.

Ähnliches gilt für die Modellbildung. Hier mangelt es, trotz aller Bemühungen, z. B. von Schneiderman et al. (2010), an einer einzugsgebietsbezogenen Verknüpfung und entsprechender Modellierung.

Im Bereich der Auswirkungen auf die biologischen Nahrungsnetze sind mehr experimentelle Analysen zu einer besseren Klärung der hoch komplexen Beziehungen notwendig. Deren Aussagen und Ergebnisse würden die Basis für eine Anpassung der EU-Wasserrahmenrichtlinie an veränderte Klima- und Umweltbedingungen bilden.

Der Aufbau von ausreichend vielen automatischen Messstationen an wichtigen Gewässern wird empfohlen, um zukünftig eine verbesserte Datengrundlage zu gewährleisten. Diese Messstationen sollten zumindest die wesentlichsten physikalisch-chemischen Variablen und als biologischen Parameter das Chlorophyll-a erfassen. Im Übrigen sollten nach dem Stand der Technik die notwendig erscheinenden Variablen erfasst werden. So wäre z. B. zur frühzeitigen Erfassung von Eutrophierung ein Sensor zur Detektion der Cyanobakterien sinnvoll. Diese Messserien sind durch entsprechend häufige biologische Beprobung zu ergänzen, um so zu Vorhersagen

von Veränderungen zu kommen bzw. diese zu überprüfen. Ebenso ist die regionale Modellbildung zu verbessern, um so präzisere, kleinräumige Vorhersagen zu ermöglichen.

2.7 Boden- und Grundwasserhaushalt
2.7 Soil and groundwater regime

2.7.1 Einleitung

Wasser, das von der Erdoberfläche in den Boden eindringt, in diesem gespeichert wird, entweder durch die Verdunstung wieder entzogen wird oder dem Grundwasser zuströmt, wird als Bodenwasser bezeichnet und der Bodenbereich, in dem es sich bewegt, als vadose Zone. Vielfach wird der Anteil, den das Wasser im Boden („Green Water") ausmacht, unterschätzt. Nach Gusev und Novak (2007) ist das Bodenwasser das aktivste Bindeglied im kontinentalen Wasseraustausch. Es ist der wichtigste Faktor für die Existenz und Entwicklung der Pflanzendecke, beeinflusst den Wärme- und Energiehaushalt des Boden-Wasser-Pflanze-Kontinuums und damit die Verdunstung und ist daher ein grundlegendes Element des globalen Klimasystems. Der Bodenwasserhaushalt, ebenso wie die Grundwasserneubildung, wird unmittelbar von Niederschlag und Verdunstung bestimmt. Jede Änderung bei diesen Eingangsgrößen hat daher unmittelbare Auswirkungen auf den Bodenwasserhaushalt.

Für die Beschreibung des Bodenwasserhaushalts ist die Veränderung des gespeicherten Wassers im Boden die entscheidende Größe, von der eben das Pflanzenwachstum, die agrarische Produktion und das Klima wesentlich abhängen. Umgekehrt hat das Klima (und etwaige Veränderungen) wieder eine Wirkung auf die Vegetation und die Produktionsbedingungen. Während die Verdunstung jene Komponente im Bodenwasserhaushalt ist, die den Entzug durch den oberen Rand der vadosen Zone darstellt, ergibt sich aus dem Verlust am unteren Rand die Tiefensickerung und in weiterer Folge die Grundwasserneubildungsrate.

2.7.2 Vorhandene Untersuchungen und Datenbasis

Das Bodenwasser ist im Vergleich zum Niederschlags- und Oberflächenwasser messtechnisch viel schwieriger quantitativ und qualitativ zu erfassen. Für ein umfassendes Bodenwassermonitoring, das EU-weit erst vor rund einem Jahrzehnt gesetzlich thematisiert wurde, sind in Österreich acht vom Hydrografischen Dienst Österreichs betriebene Pilotstationen eingerichtet (Fuchs, 2006). Davon befinden sich 5 in größeren Grundwasserleitern (Lauterach in Vorarlberg, Elsbethen in Salzburg, Stadlmoar und Kalsdorf in der Steiermark und

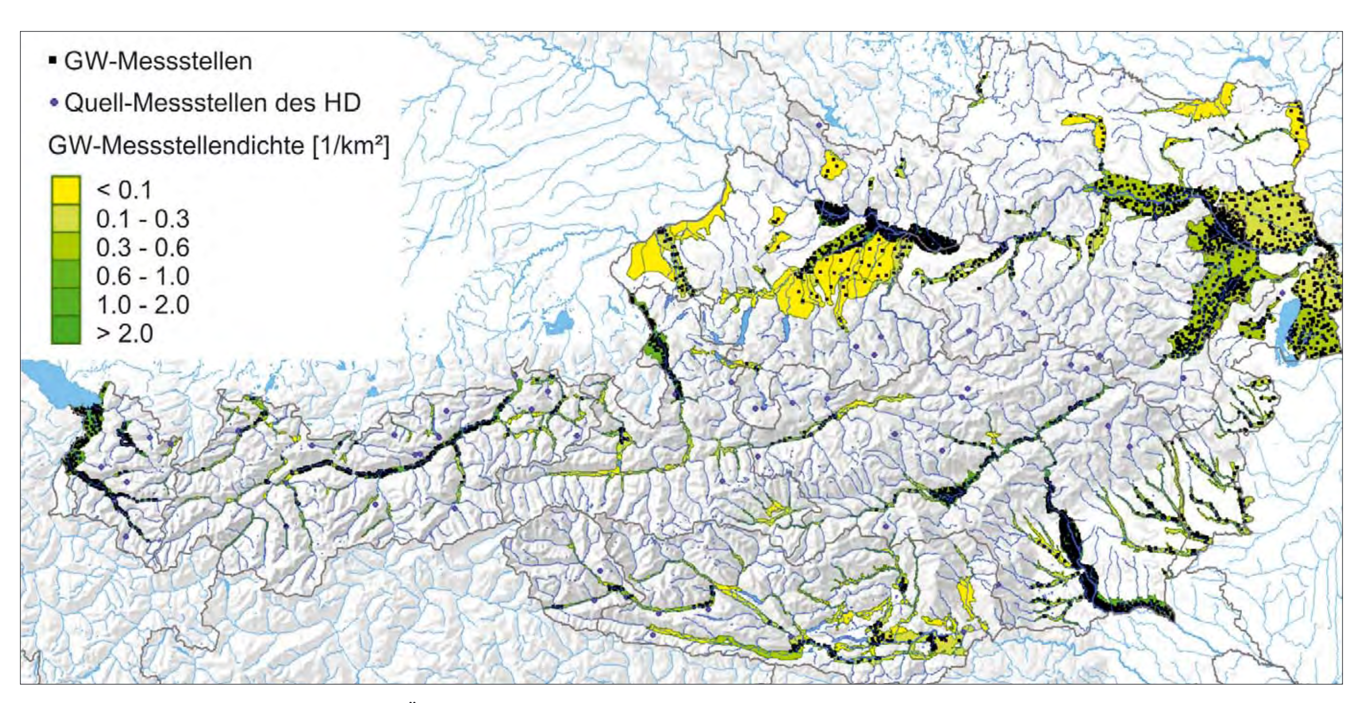


Abbildung 2.23 Grundwassergebiete in Österreich. Quelle: BMFLUW (2007)
Figure 2.23 Groundwater bodies in Austria. Source: BMLFUW (2007)

Wolfsbach in Niederösterreich), zwei in kleinen Aquiferen (Schalladorf in Niederösterreich und Leutasch in Tirol), zwei in Forsten (Kalsdorf in der Steiermark und Achenkirch in Tirol) und zwei im Hochgebirge (Zettersfeld in Kärnten und Stoderzinken in der Steiermark). Die Stationen sind zwischen 1997 und 2005 in Betrieb gegangen.

Österreichweit sind alle Lysimeter und bodenhydrologischen Messstationen in der AG Lysimete zusammengefasst. Derzeit werden insgesamt 29 in Betrieb befindliche Stationen ausgewiesen, die von 16 Institutionen betreut werden. Für einige wenige Anlagen sind langjährige Messdatenreihen vorhanden. Zeitreihen mit hoher zeitlicher Auflösung liegen seit 1992 vom Lysimeter Großenzersdorfer (Loiskandl und Klik, 1994), sowie von der Lysimeterstation Wagna (Fank, 2012) vor.

Im Gegensatz zum Bodenwasser gibt es für das Grundwasser ein dichtes Messstellennetz und lange Datenreihen. Generell liegen Grundwasseraufzeichnungen vom Hydrographischen Zentralbüro (Godina, 2000), den hydrografischen Ämtern der Länder und von Sondermessnetzen, die z. B. von Kraftwerksbetreibern und Wasserversorgern betrieben werden, vor. Wie aus Abbildung 2.23 ersichtlich, liegen die größeren Porengrundwasserkörper im Osten bzw. in den Beckenlagen Österreichs. Für die meisten großen Porengrundwasserleiter liegen Studien über die Hydrogeologie, die Nutzung, die Grundwasserneubildung, die Schwankungsbreite samt Extremwerten und das Langfristverhalten vor. Extreme Grundwasserstände, die mit einer Wahrscheinlichkeit von 1 % pro Jahr erreicht oder überschritten werden, liegen für das Grazer Feld, das Leibnitzer Feld, das nördliche und das südliche Linzer Feld, das Rheintal und den Wiener Teil des Marchfeldes von Fank und Fuchs (1999) und Fürst et al. (2011) vor.

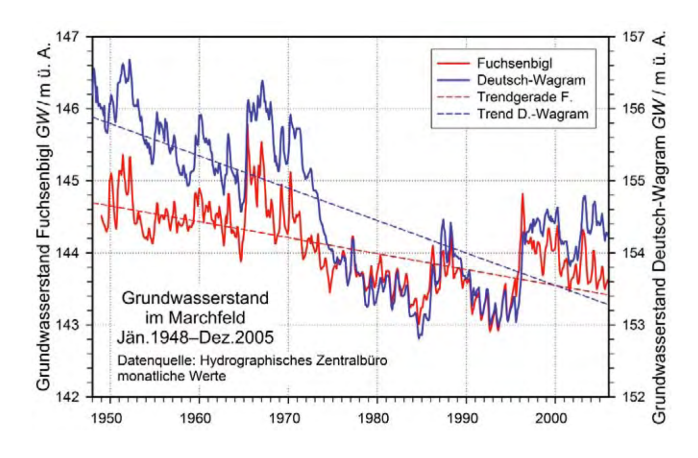


Abbildung 2.24 Grundwasserstände zweier Pegelmessstellen im Marchfeld von 1950–2010. Quelle: von Kammerer

Figure 2.24 Observed time series (1950–2010) of the groundwater table in the Marchfeld area. Source: von Kammerer

Während der in Abbildung 2.24 ersichtliche Verlauf des Grundwasserstands über mehr als 5 Jahrzehnte überwiegend von ein- bis mehrjährigen niederschlagsreichen Perioden und Trockenperioden geprägt ist (Abbildung 2.24), sind in den Dezennientrends der Abbildung 2.25 Veränderungen durch anthropogene Eingriffe (Entnahmen, Gewässerregulierungen, Versiegelung und Verdichtung des Bodens) und durch klimatische Einflüsse (Trockenperioden, Hochwässer, schneereiche Winter) leichter zu erkennen. Eine wesentliche Veränderung im Grundwasserregime des Marchfelds erfolgte durch die Inbetriebnahme des Marchfeldkanals zu Beginn der 1990er Jahre. Abgesehen von den zeitweiligen Versickerungen wird der Grundwasserkörper durch Direktentnahmen aus dem Kanal entlastet.

2.7.3 Beobachtete Veränderungen im Boden- und Grundwasserhaushalt

Zu den Veränderungen des Bodenwasserhaushalts in den letzten Jahrzehnten liegen auf Grund der wenigen Messstellen keine flächendeckenden Informationen vor.

Das generelle Verhalten des Grundwassers zeigt in den meisten Gebieten ein Absinken seit den 1960er Jahren und einen deutlichen Anstieg seit etwa Mitte der 1990er Jahre. Die Auswertung der Zeitreihen 1976 bis 2008 ergab bei 24 % der 2 376 Messstellen in den Jahresmittelwerten des Grundwasserstands eine fallende Tendenz, während 10 % einen steigenden Trend zeigten (BMLFUW, 2011). Typische Ganglinien des Grundwasserstands für das Marchfeld enthält Abbildung 2.24. Eine regionale Trenddarstellung für einzelne Jahrzehnte ist in Abbildung 2.25 dargestellt.

2.7.4 Zukünftige Veränderungen im Boden- und Grundwasserhaushalt

Das Niederschlagsgeschehen, die Strahlungsbilanz und die Temperatur bestimmen unmittelbar den Bodenwasserhaushalt und die Grundwasserneubildung. In manchen Regionen, insbesondere im Osten und Südosten, überwiegt der Niederschlag kaum die Evapotranspiration (Verdunstung), sodass nur geringe Mengen für die Grundwasserneubildung zur Verfügung stehen. Geringfügige Änderungen in einer der Klimavariablen können zu hohen prozentuellen Veränderungen in der Grundwasserneubildung führen (Nachtnebel und Fuchs, 2004).

Um den möglichen Einfluss des Klimawandels auf die Grundwasserneubildung und die Bodenfeuchte zu erfassen, wurden verschiedene Emissionsszenarien der regionalen Klimamodelle ARPEGE-ALADIN, ECHAM5-RegCM3 und

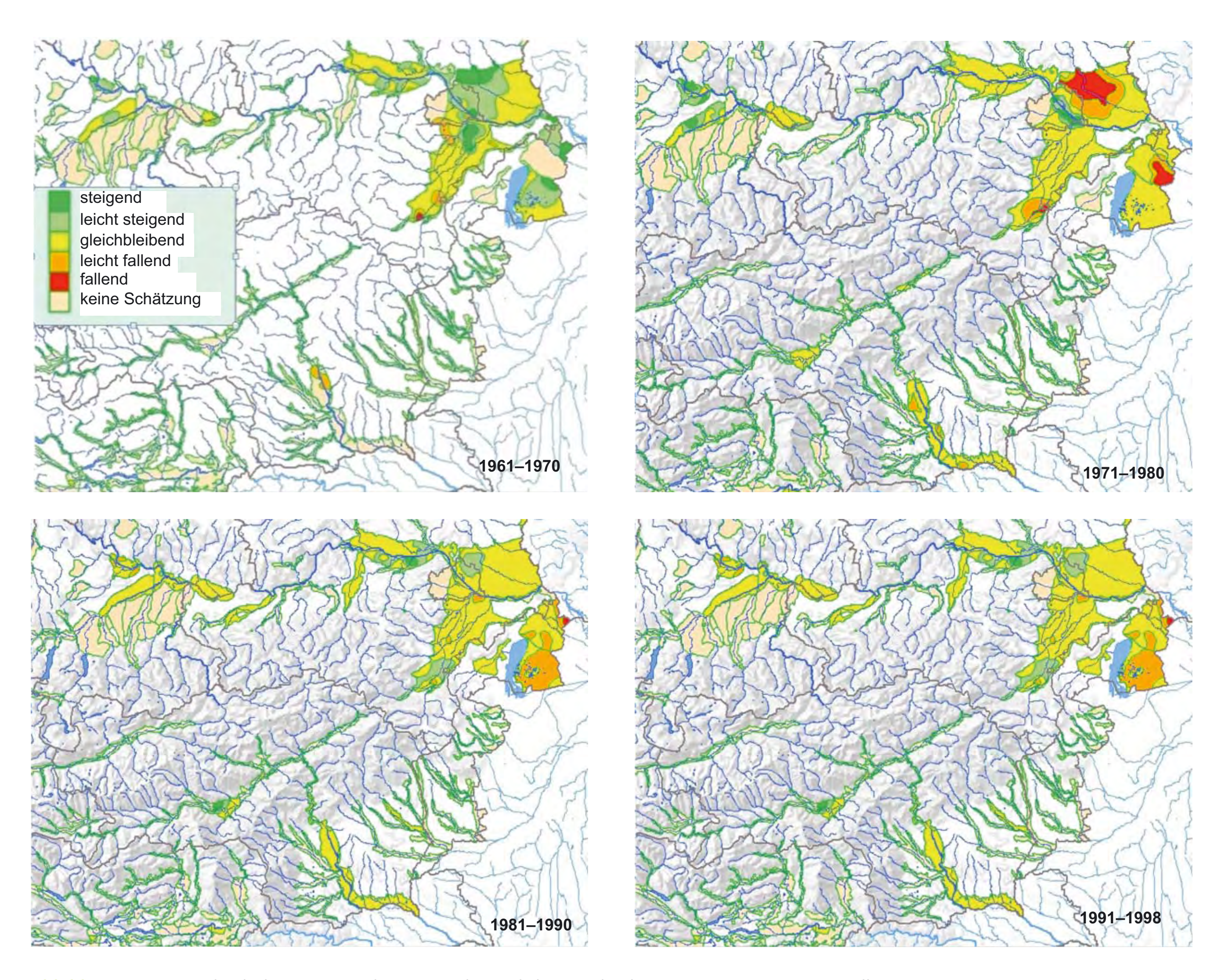


Abbildung 2.25 Trendverhalten im Grundwasser in den östlichen Beckenlagen von 1961–1998. Quelle: BMFLUW (2007)
Figure 2.25 Observed trends of the groundwater table for Eastern Austria during 1961–1998. Source: BMFLUW (2007)

REMO-UBA ausgewählt. Von diesen Modellen wurden die bias-korrigierten Niederschläge und Temperaturen als Input für ein hydrologisches Niederschlags-Abflussmodell mit 1 km Rasterlänge verwendet (Nachtnebel et al., 2010a, Nachtnebel et al., 2012). Der Basisabfluss wird dabei als Schätzgröße für die Grundwasserneubildung herangezogen, was in den Tal- und Beckenregionen in guter Näherung gilt. Insgesamt wurden 188 Einzugsgebiete analysiert. Hier werden für drei ausgewählte Regionen (Abbildung 2.26), die unterschiedliche Klimata aufweisen, die saisonalen Veränderungen in der Bodenfeuchte und in der Grundwasserneubildung über den Zeitraum dieses Jahrhunderts analysiert. Die Darstellungen beziehen sich auf das Zeitfenster März bis August, da dieses der Vegetationsperiode entspricht und somit Aussagen über den pflanzenverfügbaren Bodenwassergehalt ermöglicht.

Bodenwasserhaushalte

Bezogen auf den Referenzzeitraum 1961 bis 1990 werden die Simulationsergebnisse der Bodenfeuchte (Abbildung 2.27) und der Grundwasserneubildung (Abbildung 2.28) für den Zeitraum 2051 bis 2080 dargestellt. Für die mittlere Bodenfeuchte der Monate März bis August werden bis 2050 sowohl mit ARPEGE-ALADIN als auch mit ECHAM5-RegCM3, nur geringe Änderungen simuliert. Die dargestellte „mittlere Bodenfeuchte" entspricht dem Verhältnis aus dem mittleren Füllungsgrad des Bodenspeichers und dem Speichervermögen des Bodens im hydrologischen Modell. Für die Periode 2051 bis 2080 sind die räumlichen Muster der klimawandelbedingten Bodenfeuchteveränderung bei ARPEGE-ALADIN und ECHAM5-RegCM3 ähnlich. Beide Modelle zeigen eine Abnahme der mittleren Bodenfeuchte der Monate März



Abbildung 2.26 Regionen, für die die Änderungen der Grundwasserneubildung und Bodenfeuchte im Detail ausgewertet werden. Quelle: Nachtnebel et al. (2012)

Figure 2.26 Selected regions analysed with respect to future changes in soil moisture content and groundwater recharge. Source: Nachtnebel et al. (2012)

bis August, wobei mit ARPEGE-ALADIN stärkere Rückgänge von bis zu −18 % im östlichen Weinviertel simuliert werden.

In den Sommermonaten ist im ARPEGE-ALADIN Modell mit einem Rückgang der mittleren Bodenfeuchte in allen drei Regionen zu rechnen. Die Veränderungen sind bei Anwendung des ECHAM5-RegCM3 Modells weniger stark ausgeprägt (Abbildung 2.27).

Grundwasserhaushalt und Neubildung

Infolge der steigenden Temperatur nimmt die Verdunstung zu. Dies wird aber durch die Niederschlagsentwicklung regional teilweise kompensiert, sodass bis zur Mitte dieses Jahrhunderts keine großräumigen Veränderungen in der Grundwasserneubildung zu erwarten sind. Tendenziell ist im Süden ein leichter Rückgang festzustellen (Nachtnebel et al., 2010a). Für die Periode 2051 bis 2080 werden hingegen größere Veränderungen der Grundwasserneubildung simuliert. ARPEGE-ALADIN zeigt im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961 bis 1990 eine signifikante Abnahme. Vor allem in außeralpinen Regionen werden Abnahmen um bis zu –30 % prognostiziert. Dies ist durch die Zunahme der Temperatur und die unterschiedlichen Niederschlagsmuster und deren Veränderung zu erklären (Nachtnebel et al., 2012). Gemäß ECHAM5-RegCM3 sind die Veränderungen in der Neubildungsrate weniger stark ausgeprägt bzw. zeigen sogar leichte Zunahmen im östlichen Weinviertel und Abnahmen im Süden.

Die regionale Auswertung (Abbildung 2.28) für den Zeitabschnitt 2051 bis 2080 zeigt für ARPEGE-ALADIN ausgeprägte Rückgänge der mittleren jährlichen Grundwasserneubildung. Diese beträgt in der Region Ost –29 %. Im Gegensatz dazu wird von ECHAM5-RegCM3 eine leichte Zunahme von +4 % simuliert, was eine gesichert Aussage verunmöglicht. In den anderen Regionen wird von beiden Modellen eine Abnahme prognostiziert, wobei in der Region Süd beide Modelle nahezu übereinstimmen.

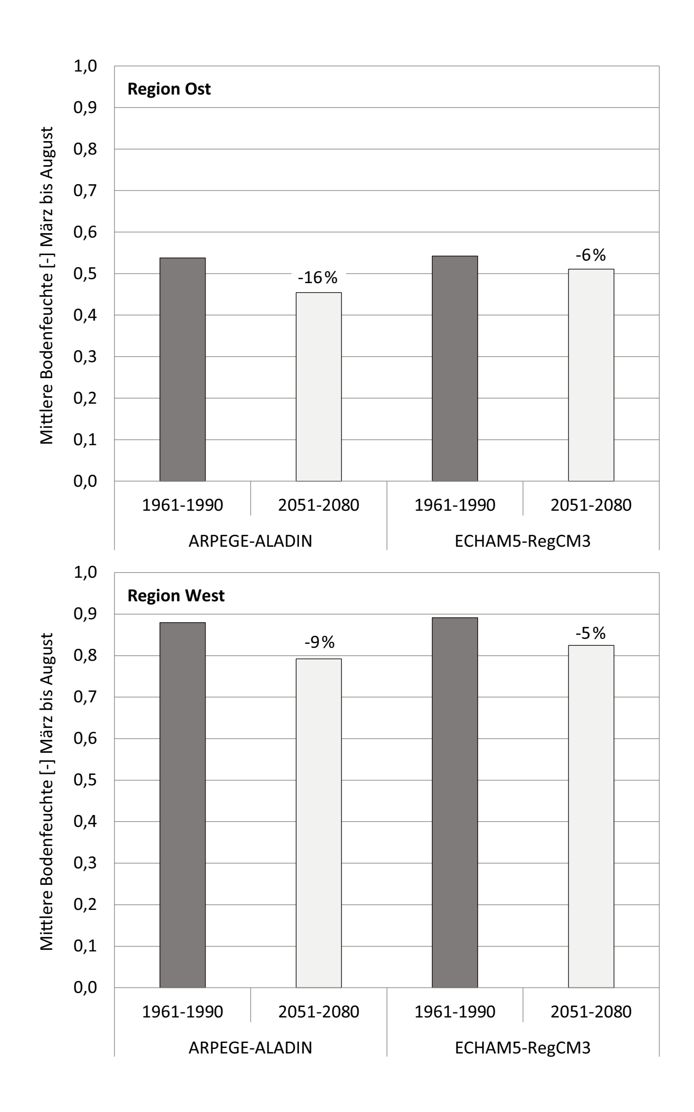
Saisonal betrachtet ist in allen Regionen in der Periode 2051 bis 2080 ein Rückgang der Grundwasserneubildung ersichtlich. Vor allem in den Sommermonaten liefern die Simulationen mit ARPEGE-ALADIN wesentlich niedrigere Grundwasserneubildungsraten als im Referenzzeitraum 1961 bis 1990.

Die Szenarienberechnungen basierend auf dem CLM-Modell (BMLFUW, 2011) zeigen für den Zeitraum 2021 bis 2050 gegenüber dem Zeitraum 1978 bis 2006 regional unterschiedliche Auswirkungen auf das Grundwasser. Für den Süden Österreichs ist mit einer Abnahme der Grundwasserneubildung zu rechnen, während im Norden und Westen eher eine erhöhte Neubildung zu erwarten ist. Begründet wird dies durch Veränderungen im Winterniederschlag und die generelle Temperaturzunahme. Weiters wird festgestellt, dass durch die vermutlich geringe Zunahme des Niederschlags und die erwartete Temperaturerhöhung in den niederschlagsarmen Gebieten im Osten Österreichs eher sinkende Grundwasserstände zu erwarten sind (BMLFUW, 2011).

Da die flächenhafte Grundwasserneubildung aus der Differenz von Niederschlag und Verdunstung gebildet wird und beide treibende Größen (Niederschlag und Temperatur) in den Klimamodellen regional unterschiedlich ausgeprägt sind, bestehen Unsicherheiten in den Schlussfolgerungen, insbesondere in den niederschlagsärmeren Gebieten im Osten und Süd-Osten Österreichs.

Stenitzer et al. (2007) erwarten für das Marchfeld selbst bei einer Zunahme der Sommerniederschläge eine klar negative klimatische Wasserbilanz während der Vegetationszeit. Dieses Wasserbilanzdefizit ist heute schon in den meisten Jahren zu beobachten.

Die veränderten Luft- und Wassertemperaturen haben letztlich auch Auswirkungen auf den Grundwasserkörper. So



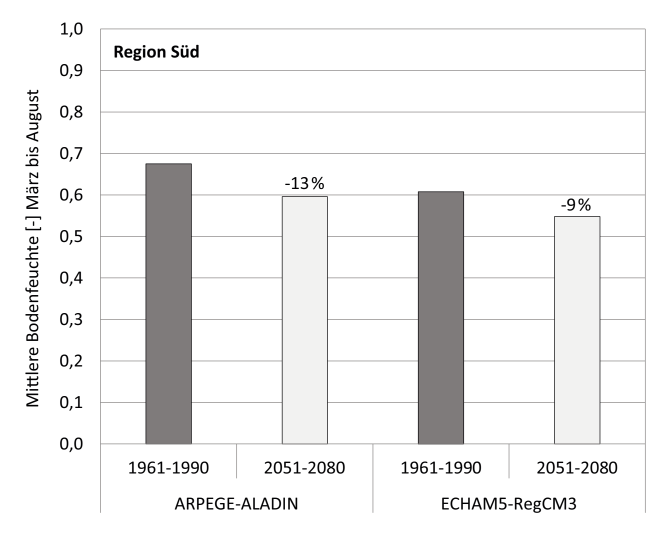


Abbildung 2.27 Änderung der mittleren Bodenfeuchte der Monate März bis August der Periode 2051–2081 im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961–1990 für die Regionen West, Ost und Süd. Quelle: Nachtnebel et al. (2012)

Figure 2.27 Changes of mean soil moisture content during the vegetation period (March–August) in 2051–2080 compared to the reference period 1961–1990 in 3 regions. Source: Nachtnebel et al. (2012)

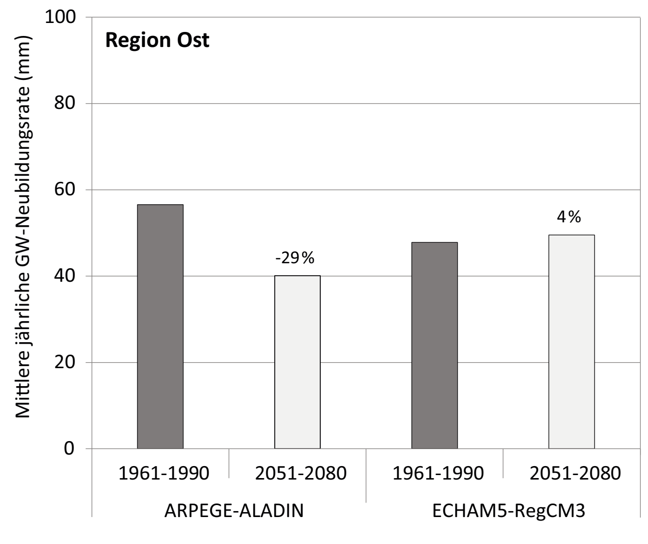
stiegen die Grundwassertemperaturen im Zeitraum 1997 bis 2009 in mehr als der Hälfte der untersuchten Messstellen um durchschnittlich 0,7 °C (Bandbreite 0,4–1,3 °C) an (Schartner und Kralik, 2011). Dieser Trend wird sich fortsetzen (BMLFUW, 2011).

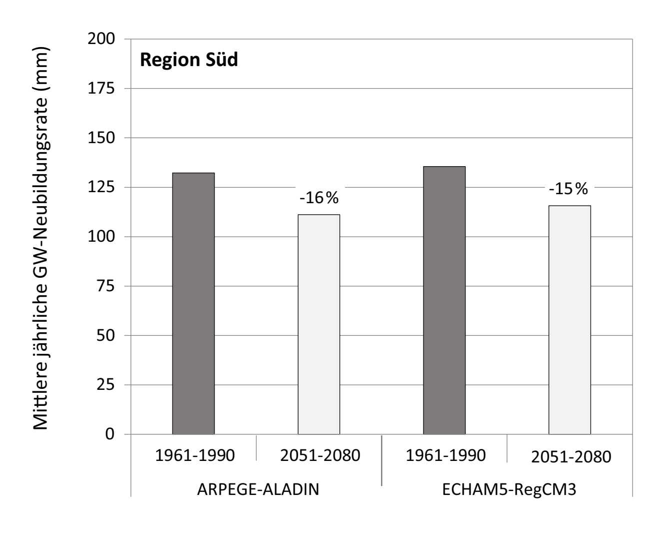
2.7.5 Zusammenfassung Boden- und Grundwasserhaushalt

Einige Regionen von Nord-Ost bis Süd-Ost weisen heute schon eine knapp ausgeglichene Wasserbilanz auf Jahresbasis auf. Die Jahresniederschlagsmenge übersteigt nur gering die jährliche Verdunstung. Kleine Änderungen in den Bilanzgrößen haben dort daher beträchtliche Auswirkungen auf den Boden- und Grundwasserhaushalt. In diesen Gebieten wird die geringe Wasserverfügbarkeit des Bodens in der Vegetationsperiode durch Bewässerung mit Grundwasser ausgeglichen (siehe dazu Abschnitt 2.8.5). In den letzten Jahrzehnten äußerte sich dieser Eingriff in stark fallenden Grundwasserständen, die erst im letzten Jahrzehnt einen gegenteiligen Trend aufweisen, was durch intensive Niederschläge mit damit einhergehenden Hochwässern zu erklären ist.

Zukünftig wird der Bodenwasserhaushalt durch den Temperaturanstieg, verbunden mit einer erhöhten Evapotranspiration, beansprucht. Wieweit dieser Effekt durch Veränderungen des Niederschlags kompensiert oder verstärkt wird, ist unsicher. Für die nächsten Jahrzehnte zeigen die Modelle ECHAM5-RegCM3 und ARPEGE-ALADIN geringe Veränderungen. Im Norden und Osten wird infolge des zunehmenden Niederschlags eine etwas erhöhte Grundwasserneubildung ausgewiesen.

Für den Zeitraum 2051 bis 2080 ist in allen Regionen ein Rückgang der Grundwasserneubildung ersichtlich. Vor allem in den Sommermonaten ergeben die Simulationen mit ARPEGE-ALADIN niedrigere Bodenfeuchten während der Vegetationsperiode als im Referenzzeitraum 1961 bis 1990. Der Süden und Süd-Osten dürfte auch stärkere Abnahmen in der Grundwasserneubildung zeigen.





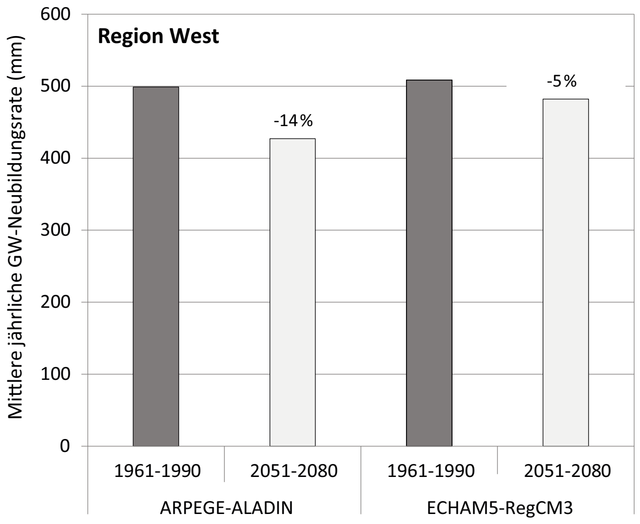


Abbildung 2.28 Änderung der mittleren jährlichen Grundwasserneubildungsrate der Periode 2051–2080 bezogen auf den Referenzzeitraum 1961–1990 für die Auswerteregionen West, Ost und Süd. Quelle: Nachtnebel et al. (2012)

Figure 2.28 Relative changes of mean annual groundwater recharge in 2051–2080 compared to the reference period 1961–1990 in 3 regions: west, east, south. Source: Nachtnebel et al. (2012)

2.8 Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft

2.8 Impacts of climate change on water management

2.8.1 Einleitung

Ziel dieses Abschnitts ist die Darstellung und Analyse der Wassernutzungen und deren Veränderungen infolge von Klimaeinflüssen. Die gesellschaftlichen Ansprüche an die Wasservorkommen lassen sich durch konsumtive und nicht-konsumtive Nutzungen beschreiben. Zu den konsumtiven Nutzungen sind die Trinkwasserversorgung, die industrielle Wasserversorgung (Brauch- und Prozesswasser) und die landwirtschaftliche Nutzung zu zählen. Nicht konsumtive Nutzungen betreffen die Energiewirtschaft, sowohl für die Kühlung als auch zur hydroelektrischen Energieerzeugung und Speicherung, die wasserbasierte Freizeit und Erholung und den Tourismus. Auch die Schifffahrt ist zu diesem Bereich hinzuzuzählen, wird aber hier nicht explizit behandelt. Zusätzlich ist noch der Anspruch der Natur in Form von Verdunstung und von Mindestabflüssen in den Gewässern zu berücksichtigen.

Eingangs wird eine Zusammenfassung der zu erwartenden Veränderungen in der Wasserbilanz gegeben, wobei deren Komponenten, der Niederschlag, die Verdunstung und der Abfluss erläutert werden. Eine ausführliche Beschreibung der Niederschlagsveränderungen ist in Band 1, Kapitel 4 enthalten. Die Abflussveränderungen werden ausführlich in Abschnitt 2.5 behandelt. Es werden verschiedene „korrigierte regionale Klimaläufe“ verwendet. Die meisten der Berechnungen beziehen sich auf die REMO-UBA-Simulationen (Jacob

et al, 2008) mit drei Emissionsszenarien A1B, B1, und A2. Weiters werden noch regionale Klimamodelle aus dem ENSEMBLES-Projekt herangezogen.

Die Veränderungen in den Wasserbilanzkomponenten sind ausführlich in Böhm et al. (2008), ÖWAV (2010), Nachtnebel et al. (2010b), Schöner et al. (2011), Kreuzinger und Kroiss (2011) und BMLFUW (2011) beschrieben. Die Auswirkungen eines besonders warmen und trockenen Sommers auf die Abflusskomponenten werden in Habersack et al. (2006) am Beispiel des Sommers 2003 dargestellt.

2.8.2 Wasserbilanz Österreichs

Die Wasserbilanz Österreichs in den letzten Jahrzehnten

Die wesentlichsten Komponenten der Wasserbilanz sind der Niederschlag als Input, während als Output die Verdunstung und der Abfluss heranzuziehen sind. Schätzungen der Bilanzkomponenten liegen von Kresser (1965, 1994), Kling et al. (2005) und Parajka et al. (2005) vor, wobei unterschiedliche Zeiträume ausgewertet wurden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2.5 zusammengestellt. Die Unterschiede in den Analysen sind sehr gering, obwohl verschiedene Zeitfenster analysiert und unterschiedliche Methoden angewandt wurden.

Tabelle 2.5 Vergleich dreier Wasserbilanzberechnungen für Österreich. Quellen: Kresser (1994); Kling et al. (2005); Parajka et al. (2005)

Table 2.5 Comparison of three water balance estimates for Austria. Sources: Kresser (1994); Kling et al. (2005); Parajka et al. (2005)

	Kresser 1961–1990	Kling 1961–1990	Parajka 1976–1997
Niederschlag [mm]	1 170	1 144	1 112
Verdunstung [mm]	516	510	499
Abfluss [mm]	654	634	604

Die auf Grund von Abflussdaten berechnete und kalibrierte Wasserbilanz (Kling et al., 2005) liefert einen langjährigen mittleren Jahresniederschlag von 1 142 mm und eine aktuelle Verdunstung von 511 mm. Die regionale Verteilung des Niederschlags und der Temperatur ist aber sehr unterschiedlich,

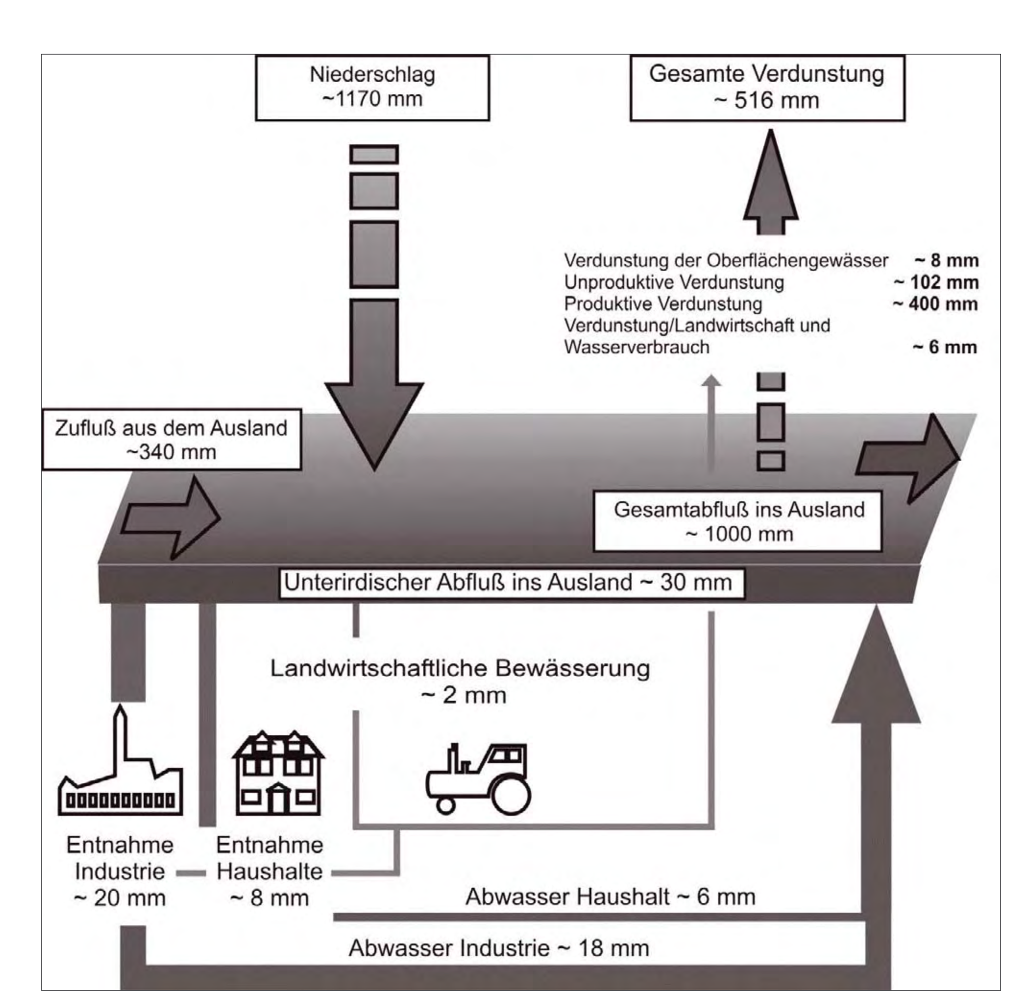


Abbildung 2.29 Mittelwerte der Wasserbilanz Österreichs für den Zeitraum 1961–1990. Übermittelt vom Hydrografischen Zentralbüro, BMLFUW, Abteilung IV/4 – Wasserhaushalt

Figure 2.29 Mean values of water balance components in for Austria for the period 1961–1990. Obtained from Austrian Central Hydrographical Bureau, Austrian Federal Ministry of Agriculture, Forestry, Environment and Water Management, Dep. IV/4 – Water balance

sodass in Regionen vom Nord-Osten bis in den Süd-Osten in den Sommermonaten der landwirtschaftliche Wasserbedarf durch Bewässerung auszugleichen ist. Insgesamt sind der landwirtschaftliche Bedarf derzeit mit 2 mm / Jahr, der Industriewasserbedarf mit 20 mm / Jahr und der häusliche Wasserbedarf mit 8 mm / Jahr anzusetzen. Das bedeutet, dass insgesamt nur ein kleiner Teil (~ 30 mm / Jahr) des Wasserdargebots genutzt wird (Abbildung 2.29), während etwa 600–650 mm / Jahr oberirdisch abfließen.

Zeitlich betrachtet zeigen die Gebiete südlich des Alpenhauptkamms negative Trends im Niederschlag, insbesondere im Abfluss, die am stärksten in den Frühjahrs- und Sommermonaten ausgeprägt sind. Dem stehen positive Abflusstrends im Winterhalbjahr (November bis April) entlang und nördlich des Alpenhauptkammes gegenüber (siehe dazu Abschnitt 2.5.2).

Zukünftige Veränderungen in der Wasserbilanz

Für die Beurteilung zukünftiger klimatisch bedingter Änderungen in der Wasserbilanz wurde das REMO-UBA-Modell (Jacob et al., 2008) mit drei Emissionsszenarien verwendet: A1B, das hauptsächlich verwendet wird, das A2- und das B1-Szenario (Nachtnebel et al., 2010a). Das A1B- und das A2-Szenario zeigen eine ähnliche Temperaturentwicklung; lediglich das B1-Szenario weist einen geringeren Temperaturanstieg auf. Bezüglich des Niederschlags ist in allen Emissionsszenarien eine starke zeitliche Variabilität festzustellen. Die Niederschlagsdaten im REMO-UBA-Modell zeigen trotz Korrektur (Formayer, 2010) im Referenzzeitraum einen Anstieg, der durch langfristige Schwankungen induziert wird. Diese wirken sich dann noch in den ersten Jahrzehnten des 21. Jahrhunderts aus, sodass alle berechneten mittleren Jahresniederschläge (Abbildung 2.30) über jenen des Referenzzeitraums liegen (Nachtnebel et al., 2010a). Betrachtet man die relative Veränderung in den simulierten Zeitreihen, zeigen alle einen langfristig leicht fallenden Trend im Niederschlag.

Infolge des weiteren Temperaturanstiegs nimmt die Verdunstung in allen Regionen zu, insbesondere im Osten und Südosten Österreichs. Der Abfluss resultiert als Differenz zwischen Niederschlag und Verdunstung. Im Zeitabschnitt um 2050 (2036 bis 2065) liegen die Simulationen der Jahresabflüsse im Süden und auch im Westen unter jenen der Periode 1961 bis 1990. Nach Osten hin werden in den Zentralalpen sowie für den gesamten Norden und Osten für diese Periode im Mittel noch etwas höhere Jahresabflüsse als im Referenzzeitraum simuliert. Zum Ende des 21. Jahrhunderts (2061 bis 2090) wird bei Verwendung des A1B-Szenarios schließlich für den Großteil des österreichischen Staatsgebiets eine Abnahme

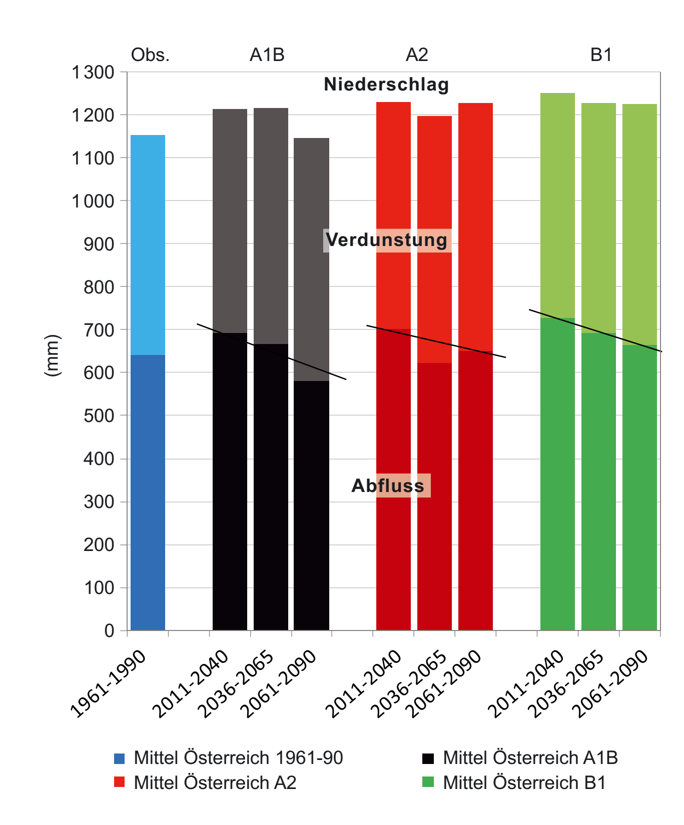


Abbildung 2.30 Wasserbilanzkomponenten Österreichs für 3 Klimaszenarien des REMO-UBA-Modells und langfristige Trends (Striche). Gesamthöhe des Balkens: Niederschlag; Dunkler Anteil: Abfluss; Heller Anteil: Evapotranspiration. Die drei Balken beziehen sich jeweils auf die Zeitfenster 2011–2040, 2036–2065 und 2061–2090. Quelle: Stanzel und Nachtnebel (2010a)

Figure 2.30 Components of the water balance for Austria for three different emission scenarios from the REMO-UBA model and long term trends (lines). Total height of the column: mean annual precipitation; Dark lower part: mean annual runoff; Bright upper part: mean annual evapo-transpiration. The three bars refer to the time slices 2011–2040, 2036–2065, 2061–2090. Source: Stanzel and Nachtnebel (2010a)

des Abflusses prognostiziert. Für große Bereiche im Westen und Süden wurden dabei Abnahmen von 10–20 % berechnet. Lediglich im Norden und Osten werden noch etwas höhere Abflüsse ausgewiesen. In alpinen Lagen nehmen tendenziell die Sommer- und Herbstabflüsse ab und die Winterabflüsse steigen. In den hochalpinen Lagen werden dabei für die zweite Hälfte des 21. Jahrhunderts Zunahmen im Winterabfluss von 30–50 % berechnet. Der Beitrag der Gletscher zum Abfluss ist insgesamt gering, aber in einigen alpinen Einzugsgebieten, insbesondere in heißen Sommern, durchaus bedeutend. Siehe dazu Abschnitt 2.3.4.

In den anderen beiden Szenarien wurden für den Jahresabfluss grundsätzlich vergleichbare Trends ermittelt (Abbildung 2.30). Im A2-Szenario ist das Bild deutlich abgeschwächter, aber ähnlich. Im B1-Szenario zeigt sich im Nordosten eine

deutliche Zunahme des Abflussanteils. Saisonal betrachtet zeigt sich eine leichte Zunahme in der Abflusskomponente im Frühjahr und im Herbst, im Sommer ist in weiten Teilen des Bundesgebiets ein fallender Trend festzustellen. Gegen Ende des 21. Jahrhunderts wird in allen Szenarien der Temperaturanstieg wirksamer, sodass auch regional kaum mehr Zuwächse im Abfluss bestehen (Nachtnebel et al., 2010a; Stanzel und Nachtnebel, 2010a).

Zusammenfassend ist festzustellen, dass, auch bei annähernd gleichbleibenden Jahresniederschlägen in allen Szenarien, die Abflusskomponente in allen drei Klimaszenarien fallende Tendenz zeigt bei gleichzeitiger Zunahme der Verdunstung. Da der Jahresniederschlag in den Simulationen – trotz der durchgeführten Korrekturen – für alle Zeitfenster etwas größer als jener im Referenzzeitraum ist, ist ein direkter numerischer Vergleich mit Tabelle 2.5 nicht möglich.

2.8.3 Trinkwasserversorgung

Beobachtete Veränderungen in der Trinkwassernutzung

Der gesamte Wasserverbrauch von Industrie und Haushalten beträgt durchschnittlich 28 mm / Jahr (Abbildung 2.29). Es bestehen kleine Unterschiede in den Wasserverbrauchsangaben zwischen ÖVGW (2008) und Abbildung 2.29, da sich diese auf unterschiedliche Zeitabschnitte beziehen. Laut ÖVGW (2008) beträgt der gesamte Wasserbedarf in Österreich 2,6 Mrd. m³, was etwa 3 % des gesamten Dargebots entspricht. Davon werden jährlich benötigt:

- für Trinkwasser: 0,8 Mrd. m³, die zu 99 % aus Karst und Grundwässern gedeckt werden;
- für Brauchwasser in Gewerbe und Industrie: 1,6 Mrd. m³;
- für landwirtschaftliche Bewässerung: 0,2 Mrd. m³.

Die zeitliche Veränderung des Wasserverbrauchs wurde von Sandner (2004) mittels einer Zeitreihenanalyse von Betriebsdaten von 24 Wasserwerken sowie für Gesamtösterreich erfasst. Die Wasserwerke wurden anhand des Kriteriums der Datenvollständigkeit ausgewählt. Es zeigt sich ein leicht rückläufiger spezifischer Verbrauch (Abbildung 2.31). Dies wird auch durch die Verbrauchsdaten Wiens (Abbildung 2.32) bestätigt. Der spezifische Wasserverbrauch ist der Verbrauch in Liter pro Person und Tag. Aus der Grafik ist abzulesen, dass der Anstieg des spezifischen Wasserverbrauchs zwischen 1973 und 1976 bei nahezu gleichbleibendem Wasserpreis erfolgte, ebenso der Rückgang im Wasserverbrauch zwischen 1985 und 1988.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass im Wiener Versorgungsgebiet die EinwohnerInnenzahl zugenommen hat und dass für beide Zeitreihen im betrachteten Zeitraum eine Zunahme der mittleren Jahrestemperatur und der Hitzeperioden zu verzeichnen war. Die Erklärung für den leichten Rückgang im Gesamtverbrauch liegt in der effizienteren Wassernutzung in den Haushalten und Gewerbebetrieben sowie in den rückläufigen Rohrnetzverlusten. Laut Erhebungen im Jahr 2011 liegt der durchschnittliche Haushaltswasserverbrauch in Österreich bei 135 Liter pro EinwohnerIn (Neunteufel et al., 2012).

Neunteufel et al. (2012) weisen nach, dass bei höheren Temperaturen und Trockenphasen der Vebrauch zunimmt (Abbildung 2.33).

Zukünftige Veränderungen in der Trinkwasserversorgung

In diesem Abschnitt wird primär die Angebotsseite, also die Wasserverfügbarkeit, und deren Veränderung infolge von Klimaeinflüssen behandelt. Die Änderungen in der Nachfrage, in der Effizienzsteigerung der Wassernutzung bleiben außer Betracht.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass für kleine Versorgungseinheiten mit ungünstigen Rahmenbedingungen eine Beeinträchtigung der Versorgungssicherheit zu befürchten ist. Beispielsweise zeigt eine Analyse der sensiblen Region Oststeiermark von Prettenthaler und Dalla-Via (Dalla-Via, 2008; Prettenthaler und Dalla-Via, 2007) auf Basis von beobachteten Grundwasserständen, klimatischen Zukunftsszenarien und deren Auswirkungen auf die Grundwasserneubildung, dass künftig eine Häufung von niedrigen und tendenziell fallenden Grundwasserständen im oststeirischen Riedelland zu erwarten ist. In Kombination mit dem dort erwarteten Anstieg des Wasserbedarfs sind daraus Maßnahmen zur Sicherstellung der Trinkwasserversorgung abzuleiten. Diese wurden durch den Bau einer Transportleitung bereits zum Teil umgesetzt.

Die Ergebnisse des CC-WaterS-Projekts (2012), das den Klimaeinfluss auf die Wasserverfügbarkeit für Trinkwasserversorgungsanlagen in Südosteuropa untersucht, und Strasser et al. (2011) zeigen für das Einzugsgebiet der Wiener Wasserversorgung leicht unterschiedliche Trends, je nach gewähltem regionalen Klimamodell. Die Simulationen mit dem ARPEGE-ALADIN-Modell zeigen einen leicht rückläufigen Trend in der Quellschüttung und im Abfluss nach 2050. Beim RegCM3-Modell ist der längerfristige Trend gegenläufig. Insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass die Quellschüttungen in etwa gleich bleiben.

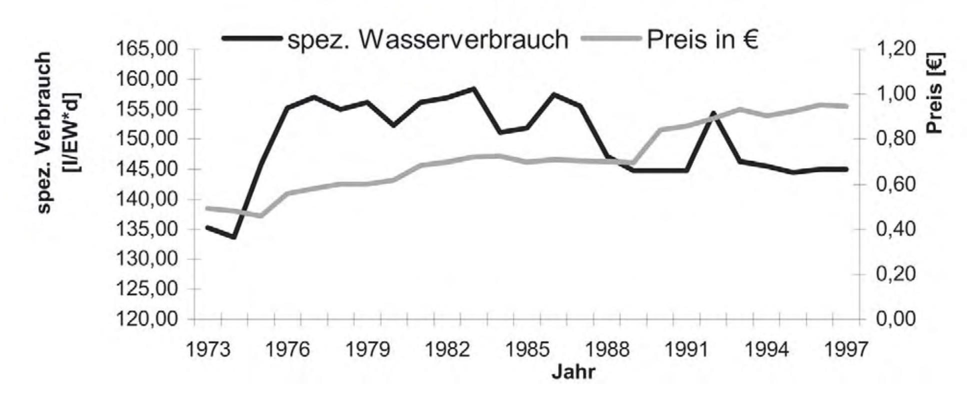


Abbildung 2.31 Zeitreihe des spezifischen Wasserverbrauchs und des Wasserpreises für 24 Wasserversorger Österreichs. Quelle: Sandner (2004)

Figure 2.31 Time series of water consumption per capita and the water price (€/m³) of 24 water suppliers in Austria. Source: Sandner (2004)

In den Wasserfassungen in Karstsystemen gehen Starkniederschläge oft mit erhöhten Trübewerten einher. Grundsätzlich haben durch Starkniederschläge verursachte Überflutungen und Murenabgänge auch direkte Auswirkungen auf die Infrastruktur der Wasserversorger (Perfler et al., 2006). Da es derzeit keine gesicherten Aussagen über eine Zunahme von Starkregenereignissen gibt (vgl. BMLFUW, 2011), kann auch keine Aussage über eine eventuelle Zunahme ihrer Auswirkungen gemacht werden.

Laut BMLFUW (2011) ist in oberflächennahen Grundwasserkörpern mit einer Temperaturerhöhung von 0,5 °C bis maximal 1 °C zu rechnen, die zeitlich und räumlich sehr unterschiedlich sein kann. Dadurch werden die biologischen Abbaugeschwindigkeiten und die Zehrung von Sauerstoff erhöht. Durch anaerobe Bedingungen kann es für die Trinkwasserversorgung zu relevanten Qualitätsveränderungen kommen.

Verbraucherseitig ist durch den Einsatz wassersparender Technologien ein weiteres Sinken des Wasserbedarfs in den Haushalten zu erwarten. Durch die laufenden Sanierungsarbeiten im Verteilernetz gehen auch die Rohrnetzverluste zurück (siehe Abbildung 2.31). Diese Einschätzungen werden durch eine Studie von Neunteufel et al. (2012) zum Haushaltswasserverbrauch bestätigt. Diese prognostiziert eine Reduktion des durchschnittlichen Haushaltswasserverbrauchs von 135 Liter pro Person und Tag im Jahr 2011 auf 120 Liter pro Person und Tag für 2050. Diese Reduktion ergibt sich als Summe des Absinkens des spezifischen Haushaltswasserverbrauchs im Innenbereich (wassersparende Technologien) und des Anstiegs des spezifischen Verbrauchs im Außenbereich (vermehrter Verbrauch bei Garten und Pool aufgrund des prognostizierten Temperaturanstiegs). Verbrauchsspitzen werden jedoch im Wesentlichen vom Verbrauch im Außenbereich an Tagen mit hohen Temperaturen ausgelöst, wodurch zukünftig höhere Tagesspitzen als bisher zu erwarten sind.

Ein im Mittel sinkender Wasserverbrauch führt zu längeren Aufenthaltszeiten des Wassers im Verteilungsnetz. Insbesondere in Kombination mit höheren Temperaturen von Grundwasser und Erdreich kann es dadurch zu qualitativen Beeinträchtigungen kommen.

Laut Dalla-Via (2008) ist in der Oststeiermark von einer weiteren Erhöhung der Anschlüsse an die kommunale Wasserversorgung auszugehen, da zahlreiche Haushalte oder Betriebe mit ihren privaten Brunnen in den Sommermonaten nicht das Auslangen finden. In Trockenperioden stehen diese privaten Wasserressourcen in einem noch geringeren Ausmaß zur Verfügung (weiteres Absinken des Grundwasserspiegels), wodurch es zu einer weiteren temporären Erhöhung des Spitzenbedarfs kommt. Eine ähnliche Situation findet man z. B. in Oberösterreich, wo 19 % der Bevölkerung aus Hausbrunnen versorgt werden (KPC, 2012).

2.8.4 Abwasserentsorgung

Die Bemessung von Kanälen und Bauwerken zur Regenwasserbehandlung basiert auf zeitlich hoch aufgelösten Niederschlagsdaten, welche über die ÖKOSTRA-Datenbank zu Verfügung gestellt werden (Rauch und Kinzel, 2007). Veränderungen der Niederschlagshöhe und der zeitlichen Verteilung der Niederschläge über das Jahr führen zu einer Veränderung der Belastung der Gewässer durch die Regenentlastung von Mischkanalnetzen sowie von Regenwasserabflüssen aus den Regenwasserkanälen von Trennsystemen. Laut ZAMG/TU-Wien Studie (BMLFUW, 2011) ist die Quantifizierung dieser klimabedingten Veränderungen mit den derzeitigen Klimamodellen jedoch nicht möglich.

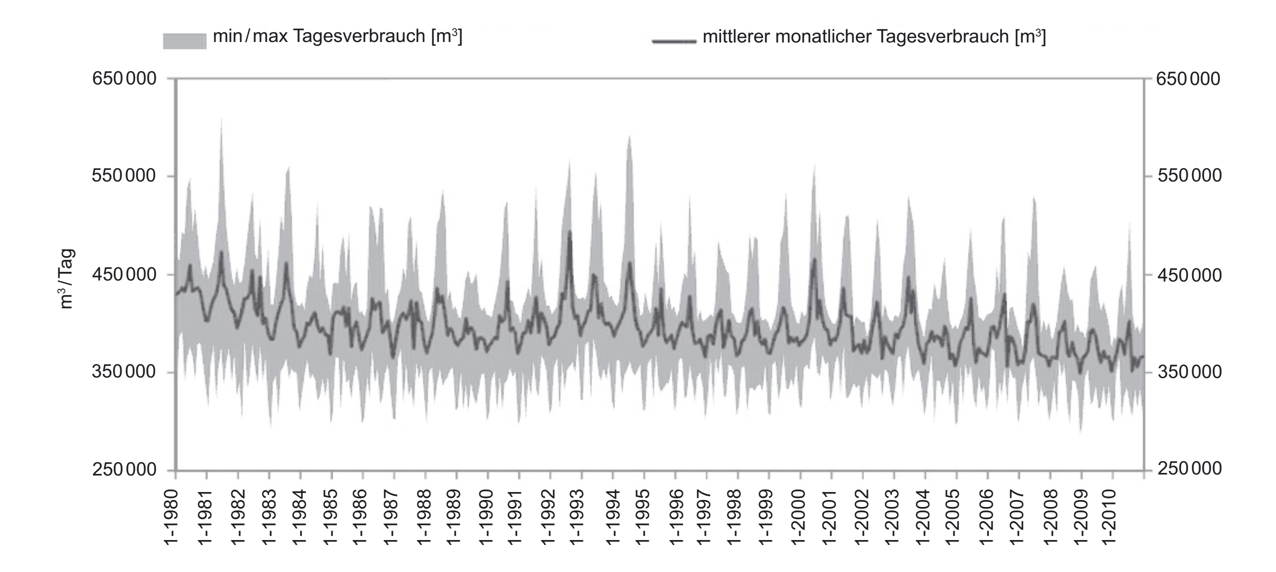


Abbildung 2.32 Zeitreihe des Wasserverbrauchs in Wien. Quelle: MA31 (2012)
Figure 2.32 Time series of water consumption in Vienna. Source: MA31 (2012)

Starkregenereignisse können zu einer temporären Überlastung des Kanalnetzes und Überschwemmungen im Siedlungsbereich führen. In Trockenperioden sind Ablagerungen und Verstopfungen im Kanalnetz sowie längere Standzeiten des Abwassers zu erwarten. Mögliche Folgeerscheinungen von längeren Standzeiten des Abwassers sind erhöhte Korrosion und Geruchsbildung sowie ein unerwünschter Vorabbau organischer Substanzen und ein ungünstiges Verhältnis der Gewichtsanteile von Kohlenstoff zu Stickstoff in der Abwasserbehandlung.

2.8.5 Landwirtschaftliche Bewässerung

Derzeitiger landwirtschaftlicher Wasserbedarf

Die jährliche Bewässerungsmenge hängt von den Niederschlagsverhältnissen in der Vegetationsperiode ab und variiert daher von Jahr zu Jahr und ist auch noch von der Feldfrucht abhängig. Bezogen auf die Gesamtwasserbilanz (Tabelle 2.5) liegt sie bei etwa 2 mm / Jahr und hat daher nur untergeordnete Bedeutung. Da aber die Bewässerungsmengen überwiegend durch Entnah-

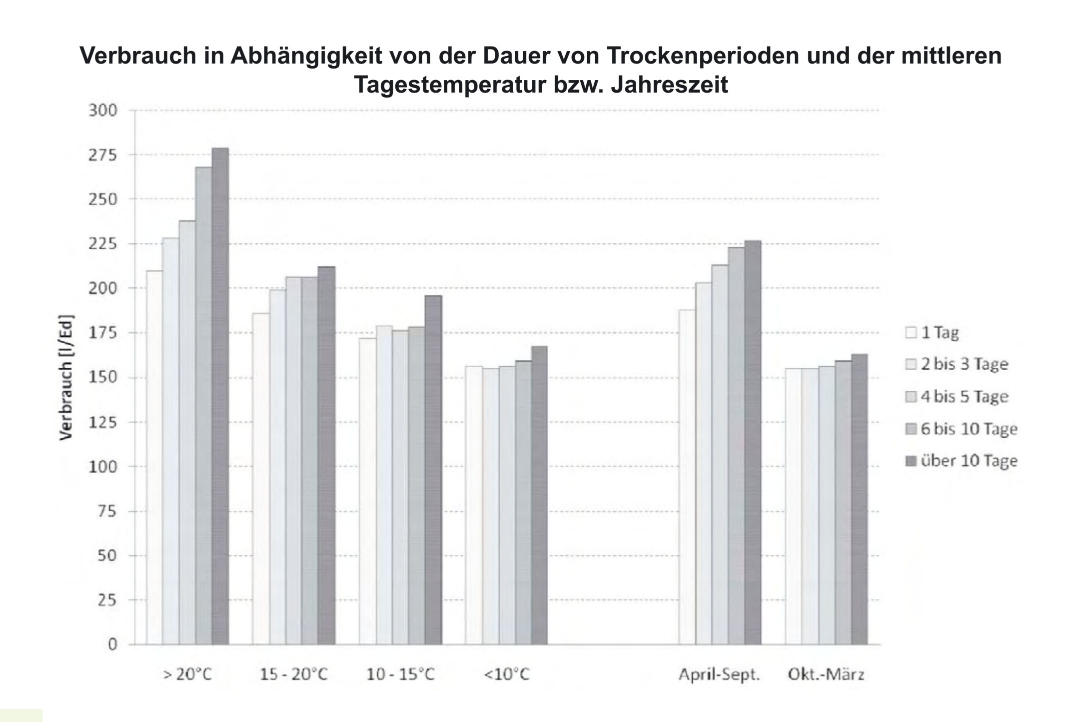


Abbildung 2.33 Spezifischer Wasserverbrauch aller Strukturgruppen in Abhängigkeit von Temperatur und Trockenperioden. Quelle: Neunteufel et al. (2012)
Figure 2.33 Specific water consumption (l / capita / day) in different seasons and under different climatic conditions. Source: Neunteufel et al. (2012)

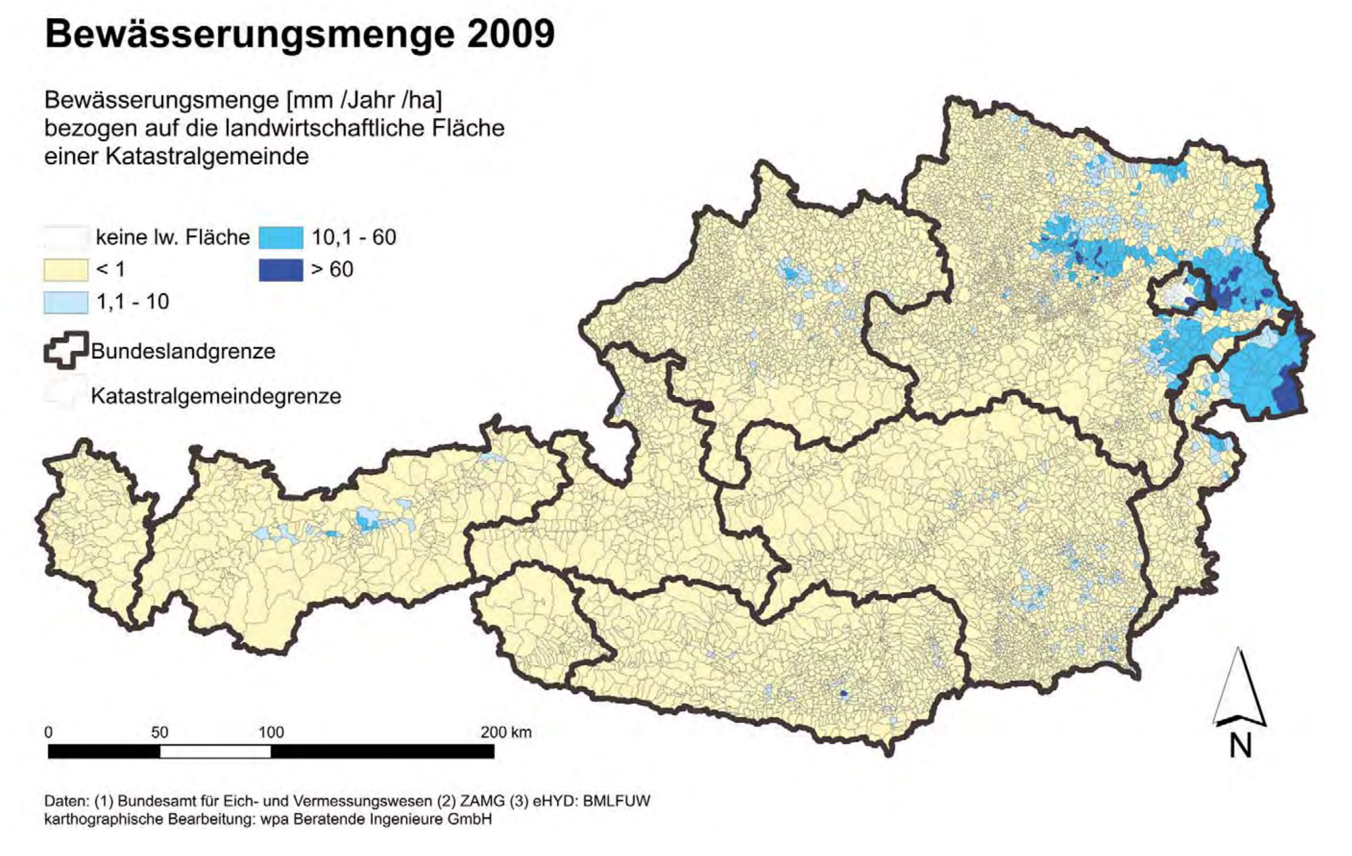


Abbildung 2.34 Bewässerungsmenge 2009 im mm/Jahr/ha bezogen auf die landwirtschaftliche Fläche. Quelle: WPA, Beratende Ingenieure (2011)

Figure 2.34 Agricultural irrigation requirements (mm/year/ha) in 2009. Source: WPA, Beratende Ingenieure (2011)

men aus regionalen Grundwassersystemen abgedeckt werden, sind sie für die regionale Wasserbilanz durchaus von Bedeutung. Eine Auswertung der einzelnen Schlagflächen (WPA, 2011) ergab für 2009 eine bewässerte Fläche von 2,3 % (65 338 ha) der landwirtschaftlichen Nutzfläche. Absolut gesehen liegt der größte Teil der bewässerten Fläche in Niederösterreich (Abbildung 2.34). Relativ zur gesamten landwirtschaftlichen Fläche ist der Anteil der bewässerten Fläche in Wien am größten, gefolgt vom Burgenland. In allen anderen Bundesländern ist der Bewässerungsanteil flächenmäßig und anteilsmäßig geringer.

Zukünftige Veränderungen des landwirtschaftlichen Wasserbedarfs

Generell ist von einer Zunahme der Verdunstung (Abbildung 2.30) und damit von einem erhöhten Pflanzenwasserbedarf auszugehen. Generell zeigt die Periode um 2050 (2036 bis 2065) etwas höhere Niederschläge und Abflusshöhen im Nord- bis Südosten. Die mittelfristigen Trends sind in allen Szenarien ähnlich (Nachtnebel et al., 2010a; Stanzel und Nachtnebel, 2010a). Im B1-Szenario sind im Nordosten Zunahmen im an sich geringen Abfluss zu erwarten (siehe dazu auch Abschnitt 2.5.4 und 2.8.2).

Auch WPA (2011) kommt zu einer ähnlichen Beurteilung. In fast allen Gebieten Nord-Ostösterreichs sollte sich der landwirtschaftliche Wasserbedarf in der ersten Hälfte des Jahrhunderts nicht erhöhen. Eine Bedarfsanalyse für Sommergerste (BMLFUW, 2011) ergibt für die Einzugsgebiete Raab, Wulka, Rußbach, Pulkau und Antiesen für den Zeitraum 2020 bis 2050 keinen zusätzlichen Wasserbedarf im Vergleich zur Referenzperiode 1976 bis 2006.

Eitzinger et al. (2008, 2010) zufolge erhöhen die zunehmenden Temperaturen das Verdunstungspotenzial überproportional, was eine Zunahme der Beanspruchung der Bodenwasserressourcen durch die Vegetation bedeutet bzw. Bewässerungsmaßnahmen erfordern würde. In den niederschlagsarmen Anbaugebieten Österreichs würden insbesondere Sommerkulturen zunehmend dem Hitze- und Trockenstress ausgesetzt sein. Die regionalen Unterschiede im Ertragspotenzial nehmen generell auf Grund unterschiedlicher Wasserversorgung (z. B. Bodenwasserspeichervermögen) zu. Standorte schlechter Böden verlieren gegenüber Standorten mit guten

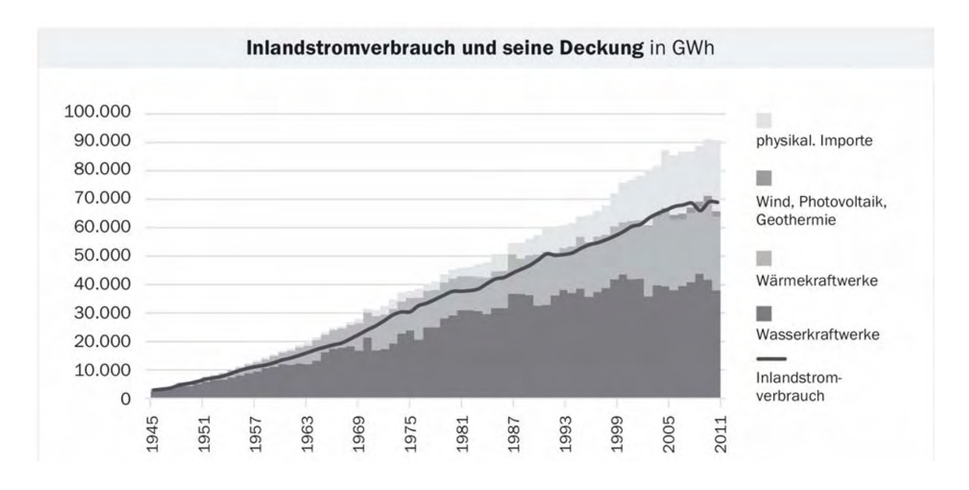


Abbildung 2.35 Entwicklung des Inlandsstromverbrauchs von 1945–2011. Quelle: e-Control (2011)

Figure 2.35 Time series of electric consumption in Austria from 1945–2011. Source: e-Control (2011)

Böden. In Eitzinger et al. (2008) wird zusammenfassend festgestellt: bei einer mäßigen mittleren Temperaturerhöhung bis ca. 2 °C (wie sie bis zu den 2040er Jahren regional erwartet wird) könnten in Summe die positiven Effekte auf das Ertragspotenzial in der Landwirtschaft überwiegen, bei einer Temperaturerhöhung von > 2 °C würden zunehmend negative Effekte auftreten. Die Vegetationszeit wird um ca. 7–10 Tage pro Dekade länger, beginnt früher und die Entwicklungsraten der Pflanzen werden beschleunigt. Das Produktionspotenzial in bisher von der Temperatur begrenzten Anbauregionen würde sich insbesondere durch eine verlängerte Vegetationsperiode verbessern, wie z. B. die Futtergewinnung in vielen niederschlagsreichen Grünlandregionen, wobei ein erhöhtes Risiko von Frostschäden durch Spätfröste zu erwarten sein kann.

2.8.6 Wasserkraftnutzung

In diesem Abschnitt werden die hydro-meteorologischen Auswirkungen des Klimawandels auf die Stromerzeugung aus Wasserkraft diskutiert (siehe dazu auch Band 3, Kapitel 3).

Beobachtete Entwicklung in den letzten Jahrzehnten

Österreich deckt derzeit etwas weniger als 60 % des Verbrauchs elektrischer Energie durch Wasserkraft. Der *Wasserkraftanteil* am Stromverbrauch lag 2010 bei ca. 58,5 % (e-control, 2011). Aufgrund des stetig steigenden Energieverbrauchs und der begrenzten Kapazitäten (der Zuwachs an neuen Wasserkraftanlagen ist seit den 1990er Jahren gering), nimmt der Anteil der Wasserkraft an der Gesamtenergieproduktion stetig ab.

Die Entwicklung des Bedarfs und der Erzeugungsanteile (Wasser- und Wärmekraftwerke) ist in Abbildung 2.35 dargestellt. Als Beispiel für klimabedingte Änderungen wurde die Entwicklung der Jahreserzeugungskoeffizienten (Abbildung 2.36) der Kraftwerke der Austrian Hydro Power AG (AHP) im Zeitraum 1950 bis 2007 untersucht. Der Erzeugungskoeffizient ist der Quotient aus der Jahreserzeugung und dem Regelarbeitsvermögen eines oder mehrerer Wasserkraftwerke. Aus Abbildung 2.36 ist ersichtlich, dass die Erzeugungskoeffizienten von 1960 bis 2002 tendenziell geringer wurden. Dies stimmt gut mit den beobachteten Trends im Abfluss überein (Abbildung 2.13). Einzelne Jahre mit sehr warmen trockenen Sommern und ausgeprägten Schmelzbeiträgen der Gletscher wurden in Hinblick auf die hydroelektrische Energieerzeugung in Habersack et al. (2006) ausgewertet.

Zukünftige Veränderungen bezüglich Energiewirtschaft

Hydroelektrische Energieerzeugung

Über den gesamten Zeitraum 2001 bis 2100 wurden die Zeitreihen der Abflüsse mit dem REMO-UBA-Modell für die Emissionsszenarien (A1B, A2, B1) simuliert und daraus das Abflusspotenzial für die Flussgebiete ermittelt (Nachtnebel et al, 2010a). Unter Verwendung früherer Studien zum Abflussflächenpotenzial in Österreich (Schiller und Drexler, 1991; Pöyry, 2008) wurde das Verhältnis zwischen Flächen- und Linienpotenzial bzw. zwischen Flächenpotenzial und tatsächlicher Jahresenergieerzeugung abgeleitet. Unter Beibehaltung dieser Faktoren kann dann aus der zukünftigen Veränderung des Abflusspotenzials eine Aussage über eine Veränderung in der Energieerzeugung abgeleitet werden.

Betrachtet man nur die relativen Veränderungen im 21. Jahrhundert (Nachtnebel et al., 1999; Nachtnebel, 2010a; Stanzel und Nachtnebel, 2010b; Kling et al., 2012; Nacht-

nebel et al., 2012), zeigt sich in allen drei Szenarien eine Abnahme der Energieproduktion aus Wasserkraft. Die Abnahme zwischen 2025 und 2075 liegt bei rund 15 % im A1B-Szenario, bei rund 6 % bei A2 und beträgt 8 % im B1-Szenario. Interessant ist auch der Vergleich zwischen A1B und A2, da die Temperaturentwicklung in diesen beiden Szenarien (im Mittel für ganz Österreich) ähnlich ist, die Verläufe der Niederschlagsmengen aber unterschiedlich sind.

Bezüglich der saisonalen Veränderungen (Abbildung 2.37) zeigt die hydroelektrische Produktion im Sommer einen Rückgang, während sie im Winter zunimmt, d. h. es kommt zu einer Vergleichmäßigung des Jahresganges. Die relative Zunahme von 2025 bis 2075 im Winterhalbjahr liegt dabei zwischen fast 9 % (B1) und 18 % (A2). Die Abnahme im Sommerhalbjahr schwankt zwischen 13 % (A2) und 24 % (A1B).

In BMLFUW (2011) wird der Klimaeffekt auf die hydroelektrische Energieerzeugung deutlich geringer eingeschätzt. Die dort angegebenen Änderungen des mittleren jährlichen theoretischen Wasserkraftpotenzials 2021 bis 2050 im Vergleich zu 1976 bis 2006 werden mit weniger als ±5 % angegeben. Die Autoren erwarten für ganz Österreich, mit Ausnahme des Südens, eine Erhöhung des Wasserkraftpotenzials im Winter um ca. 20 %. Im Osten (Flachland) ist möglicherweise eine Abnahme des Wasserkraftpotenzials im Frühjahr und im Westen (Alpen) eine Abnahme des Wasserkraftpotenzials im Sommer um jeweils ca. 10–20 % zu erwarten. Generell dürfte die Leistung der Laufkraftwerke im Winter zunehmen und sich im Sommer wenig verändern, woraus eine bessere Anpassung an den Verbrauch resultiert.

Die Unterschiede in den Berechnungen sind durch die treibenden Klimamodelle, die angewandten Korrekturverfahren und zu einem geringen Teil durch die verwendeten hydrologischen Modelle erklärbar.

Neben der Energieaufbringung sind noch zukünftige Änderungen im jahreszeitlichen Energiebedarf zu berücksichtigen. Diese Fragestellungen werden in Kranzl et al. (2014) behandelt. Weiters wird auf Band 3, Kapitel 3 verwiesen.

Kühlwasserbedarf

Bei der Beurteilung der Wirkungen des Klimawandels auf die Energiewirtschaft ist auch der Kühlwasserbedarf zu erfassen. Dabei ist die Lage der kalorischen Anlagen, das saisonale Abflussverhalten, insbesondere die Auftrittszeiten von Niederwässern, und die Wassertemperatur zu berücksichtigen. Die größten kalorischen Anlagen liegen an der Donau, am Inn, an der Mur, und an der Ager.

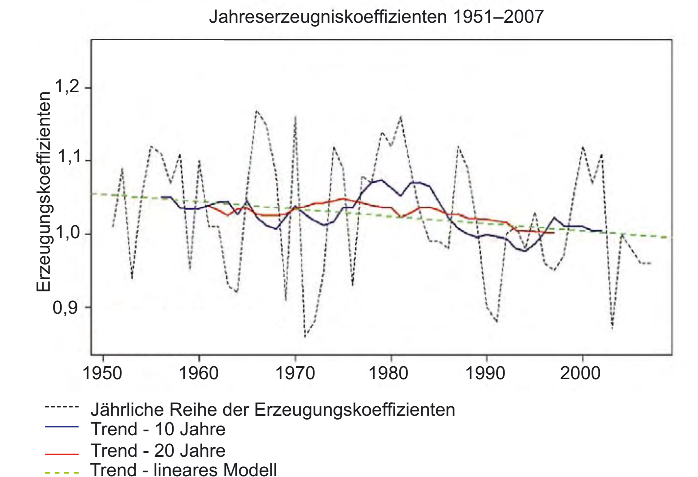


Abbildung 2.36 Jahreserzeugungskoeffizienten der Wasserkraft in Österreich für den Zeitraum 1950–2007. Quelle: Böhm et al. (2008)

Figure 2.36 Coefficient of annual hydropower generation from 1950–2007. Source: Böhm et al. (2008)

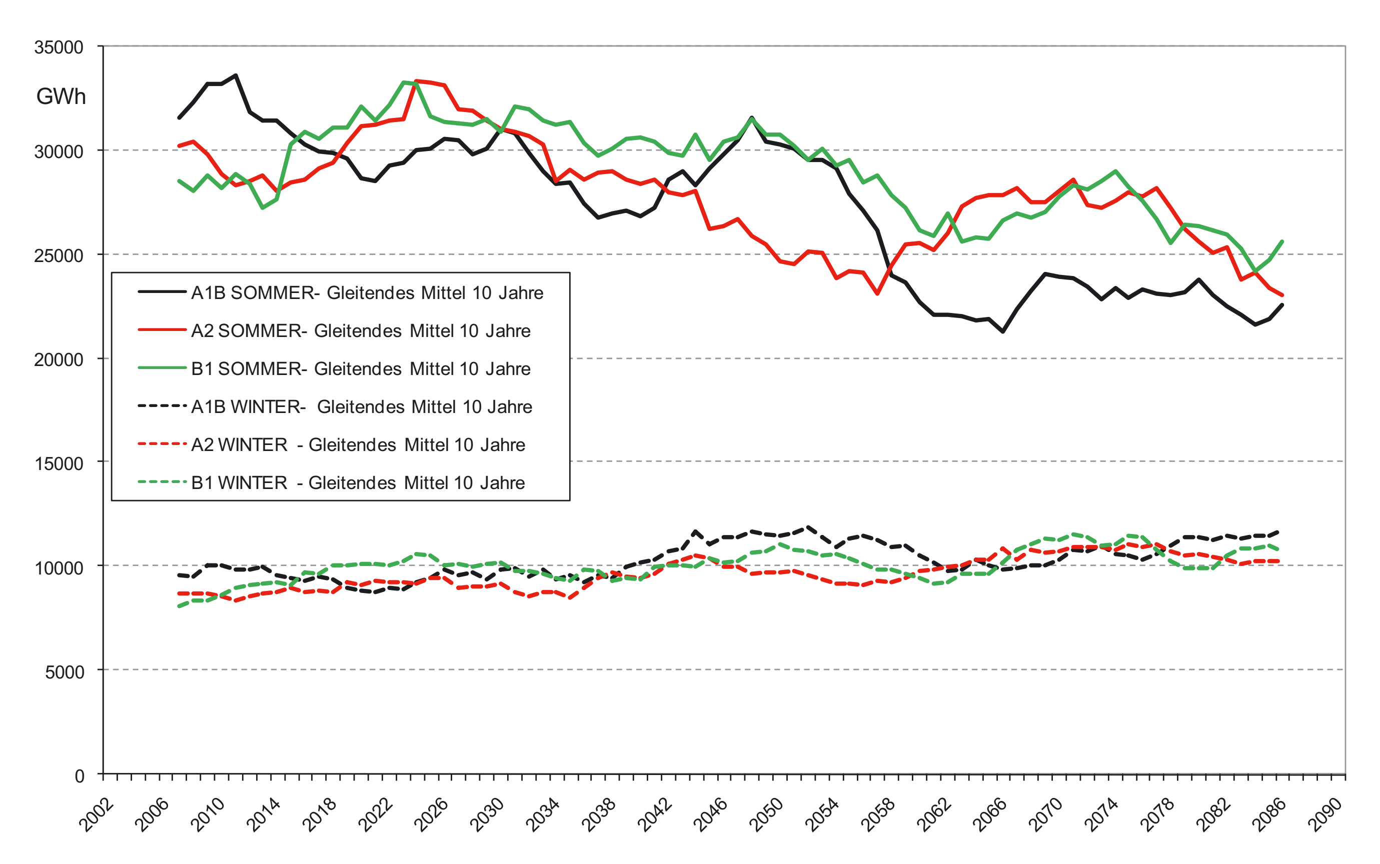
Die Kühlwasserverfügbarkeit wurde über Veränderungen im Zeitpunkt des Auftretens und der Abflussführung in Niederwasserperioden beurteilt (siehe dazu auch Abschnitt 2.5.7). In Tab.2.6 sind die Q_{95}-Abflüsse aufgelistet. Das sind jene charakteristischen Niederwasserabflüsse, die mit 5 % Wahrscheinlichkeit noch unterschritten werden können.

Für die größeren, alpin geprägten Flüsse mit größeren kalorischen Anlagen und damit entsprechendem Kühlwasserbedarf (Salzach, Mur) sind überwiegend Zuwächse und jedenfalls keine signifikanten Rückgänge des Niederwasserabflusses zu erwarten. An kleineren Vorlandflüssen, wie der Ager, können allerdings deutliche Abnahmen des Abflusses in Niederwasserperioden auftreten. An solchen Gewässern kann es vor allem in Kombination mit einer zeitlichen Verschiebung der Niederwasserphasen in die wärmeren Sommermonate und dem generellen Anstieg der Wassertemperatur zu Problemen mit Kühlwassereinleitungen kommen.

Tabelle 2.6 Simulierte Veränderungen von Q_{95} (m^3/s) in 3 Flussgebieten, Szenario A1B aus dem REMO-UBA-Modell. Quelle: Nachtnebel et al. (2010a)

Table 2.6 Simulated changes of Q_{95} low flows (m^3/s) in three river basins. A1B scenario from REMO-UBA model. Source: Nachtnebel et al, (2010a)

Periode	Salzach	Mur	Ager
1961–1990	78,9	60,0	9,9
2011–2040	80,0	57,7	9,5
2036–2065	87,3	56,1	8,0
2061–2090	90,0	59,1	6,8



Abdruck mit freundlicher Genehmigung von Springer Science+Business Media: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt und die Wasserkraftnutzung in Österreich, Band 62 (9-10), 2010, S. 186 , P. Stanzel, H. P. Nachtnebel , Abb. 6

Abbildung 2.37 Mittel der mit dem REMO-UBA-Modell simulierten hydroelektrischen Energieerzeugung für Österreich im Zeitraum 2006–2090 (Winter- und Sommerhalbjahr). Quelle: Stanzel und Nachtnebel (2010b)

Figure 2.37 Seasonal hydropower generation (winter: October–March, summer: April–September) from 2006–2090. The driving climate model is REMO-UBA. Source: Stanzel und Nachtnebel (2010b)

Holzmann und Koboltschnig (2010) ermitteln für die Obere Salzach seltener werdende Niederwasserperioden im Winter; während der Herbstmonate ist ein geringer Anstieg der Niederwasserphasen gegenüber dem Referenzzeitraum bei Szenario A1B wahrscheinlich.

Für die Abschätzung der Entwicklung der Wassertemperatur (Nachtnebel et al., 2010a) wurden für die betrachteten Fließgewässer die mittleren monatlichen Wassertemperaturen mit einem einfachen Modell nach Hofstetter (Nobilis und Webb, 1994) berechnet, für das die notwendigen Eingangsgrößen Lufttemperatur und Wasserführung auch für die Zukunftsszenarien vorlagen. Eine Temperaturerhöhung der Fließgewässer kann zumindest in kritischen Zeiträumen (lange sommerliche Trockenperioden) zur Reduktion der zulässigen Ableitung von Wärmefrachten aus Gewerbe, Industrie und Kraftwerken in Gewässer führen (BMLFUW,2011).

2.8.7 Zusammenfassung Wasserwirtschaft

Da die natürliche Variabilität des mittleren jährlichen Abflusses deutlich größer ist als die zu erwartenden Änderungen zufolge Klimaänderung für 2021 bis 2050, erscheinen aus österreichweiter Sicht andere Bewirtschaftungsmaßnahmen in Hinblick auf das Wasserdargebot der Oberflächenwasser nicht grundsätzlich notwendig (BMLFUW, 2011). Regional betrachtet kann es aber durchaus zu deutlichen Veränderungen kommen und jene Regionen, die schon jetzt geringe Abflussspenden (< 10 l/s/km^2) aufweisen (vor allem im Osten und Südosten Österreichs), sind bei den Anpassungsmaßnahmen besonders zu berücksichtigen.

Bezüglich des Trinkwasserverbrauchs sind sowohl die mögliche Änderung im Wasserdargebot als auch der steigende Bedarf infolge erhöhter Temperatur sowie die erhöhte Nutzungseffizienz inklusive der Rückgang der Verteilungsverluste zu berücksichtigen. In einigen Regionen (z. B. in der Oststeiermark und in Oberösterreich) besteht noch Potenzial für weite-

re Anschlüsse an die kommunale Wasserversorgung, wodurch es zu einer temporären Erhöhung des Spitzenbedarfs kommen wird. Bei den großen Wasserversorgungsunternehmen werden auch zukünftig keine Engpässe gesehen.

Der landwirtschaftliche Bewässerungsbedarf konzentriert sich auf die Flachlandgebiete im Süden und Osten und wird derzeit mit einem Anteil von 2 mm an der gesamten Wasserbilanz veranschlagt. Bei einer mäßigen mittleren Temperaturerhöhung bis ca. 2 °C (wie bis zu den 2040er Jahren erwartet) könnten in Summe die positiven Effekte auf das Ertragspotenzial in der Landwirtschaft überwiegen, bei einer Temperaturerhöhung von > 2 °C würden zunehmend negative Effekte auftreten. Im Süden und Süd-Osten ist regional eine Zunahme der Bewässerung zu erwarten.

Die Energiewasserwirtschaft wird eine tendenziell fallende Jahreserzeugung aufweisen, wobei durch die Zunahme der Wintererzeugung und Abnahme der Sommererzeugung eine bessere Anpassung an die Verbrauchsganglinie gegeben ist. Bezüglich der quantitativen Angaben zur hydroelektrischen Energieerzeugung bestehen Unterschiede zwischen den einzelnen Studien, die hauptsächlich aus verschiedenen verwendeten Klimamodellen resultieren. Bei Verwendung der REMO-UBA-Simulationen zeigt sich in allen drei Szenarien (Nachtnebel et al., 2010a) eine Abnahme der Energieproduktion aus Wasserkraft. Die Abnahme zwischen 2025 und 2075 liegt bei rund 15 % im A1B-Szenario, bei rund 6 % bei A2 und beträgt 8 % im B1-Szenario. Diese Szenarien weisen zwar unterschiedliches Verhalten im Niederschlag auf, dies wird aber durch den Temperaturanstieg weitgehend kompensiert. In der ZAMG / TU-Wien Studie (BMLFUW, 2011) werden wesentlich kleinere Einbußen der hydroelektrischen Energieerzeugung ausgewiesen. Die zukünftigen Änderungen in der Jahresenergieerzeugung werden mit ±5 % eingestuft, während die Wintererzeugung um bis zu 20 % steigen könnte. Regional kann im Westen Österreichs ein Rückgang der Erzeugung im Sommer von bis zu 20 % auftreten.

Bezüglich des Kühlwasserbedarfs sind die Wassertemperatur, die Abflussmenge und der Bedarf im Jahresgang zu berücksichtigen. Für die Salzach wird für das 21. Jahrhundert eine leichte Erhöhung der Niederwasserführung prognostiziert, an der Mur kommt es zu einer geringfügigen Verringerung. Für die Fließgewässer im Alpenvorland, wie die Ager, muss bis zum Ende des 21. Jahrhunderts mit einem deutlicheren Rückgang der Niederwasserführung gerechnet werden. Für kalorische Kraftwerke an der Donau bestehen keine Probleme bezüglich des Kühlwasserbedarfs.

2.9 Forschungsbedarf
2.9 Research needs

Vergleicht man die Simulationen der regionalen Klimamodelle in der Referenzperiode 1961 bis 1990 mit den Beobachtungen, so sind noch immer deutliche systematische Abweichungen festzustellen. Die Abweichungen treten sowohl im saisonalen Geschehen als auch in den regionalen Daten auf. Für eine heterogene alpine Topografie hat dies zur Folge, dass derzeit Aussagen auf Einzugsgebietsebene noch mit beträchtlichen Unsicherheiten behaftet sind, insbesondere Aussagen zu Extremereignissen.

Aus hydrologischer Sicht besteht daher die Forderung nach regionalen Klimamodellen mit einer räumlichen Auflösung von 1 km und besserer Abbildung der meteorologischen Prozesse in alpinen Räumen.

Gleichzeitig bedeutet dies auch, dass das hydro-meteorologische Messnetz in Lagen über 2 000 m deutlich zu verdichten sein wird. Einerseits um Modelle besser kalibrieren zu können und andererseits um das Prozessverständnis über das Zusammenwirken von Klima, Vegetation und Hydrologie zu verbessern. Repräsentative, weitgehend unbeeinflusste Testgebiete sind aufzubauen, die eine langfristige kontinuierliche Beobachtung, begleitet von Experimenten, ermöglichen.

Die hydrologischen Prozesse werden aber neben dem Klima auch wesentlich durch anthropogene Eingriffe verändert. Diese betreffen v. a. die Landnutzung. So hat z. B. die Waldfläche von 1950 bis 1995 um 4 004 km² zu- und die Fläche des Grünlandes (Wiesen, Weisen, Almen) um 4 187 km² abgenommen (Krausmann, 2001). Dadurch werden das Retentionsverhalten und die Evapotranspiration wesentlich beeinflusst. Ebenso verändern die wasserbaulichen Einrichtungen (Schutzwasserwirtschaft, Wasserkraftwerke und deren Speicher) nachweislich das Abflussgeschehen. Große Retentionsflächen fallen in den Niederungen durch die Schutzwasserwirtschaft weg, während in den hochalpinen Räumen nennenswerte Speicherräume geschaffen werden. Dies hat zur Folge, dass nahezu alle hydrologischen Beobachtungsreihen trendbehaftet sind, sodass die Trennung von Klimaeinfluss und direkter anthropogener Einwirkung schwierig ist. In manchen Einzugsgebieten ist derzeit der anthropogene Einfluss deutlich stärker wirksam als der Klimaeffekt. Für eine sich laufend verändernde Umwelt sind daher bessere diskriminative hydrologische Methoden zu entwickeln. Die Instationarität in den Reihen und deren räumliche Heterogenität erfordern neue Methoden zur Ableitung von Bemessungsgrößen und für den Betrieb von wasserwirtschaftlichen Einrichtungen.

Bei vielen hydrologischen Analysen wird oft von den derzeitigen Randbedingungen ausgegangen. Es sind Modelle zu entwickeln, die die klimainduzierten Veränderungen des Bodens, der Vegetation und der Landnutzung in die Modelle integrieren, um realistische Simulationen zu ermöglichen.

Dies setzt eine verstärkte Kooperation zwischen den einzelnen Fachbereichen (Meteorologie, Hydrologie, Land- und Forstwirtschaft, Raumplanung, Wasserwirtschaft) voraus. Ähnlich werden auch die Aufgabenstellungen in der Limnologie und der aquatischen Biologie gesehen. So sollten etwa die Ergebnisse regionaler Klimavorhersagen mit den entsprechenden hydrologischen und limnologischen Erwägungen zusammengeführt werden, um so zu einer ganzheitlichen Betrachtung zu führen. Ähnliches gilt für die Modellbildung.

In der Impaktforschung – nicht nur im Bereich der Wasserwirtschaft – sollten generelle Abstimmungen / Vorgaben für weitere Analysen erfolgen. Um eine bessere Vergleichbarkeit der Projektergebnisse zu ermöglichen, sollten einheitliche Referenzperioden (die World Meteorological Organisation bezieht sich meist auf den Zeitraum 1961 bis 1990) gewählt werden. Ähnlich wäre eine Definition zukünftiger Analyseperioden, z.B. 2001 bis 2030 (unmittelbare Zukunft), 2035 bis 2064 (mittelbare Zukunft), und 2061 bis 2090 (fernere Zukunft) hilfreich.

2.10 Literaturverzeichnis
2.10 References

Abermann, J., Lambrecht, A., Fischer, A., Kuhn, M., 2009. Quantifying changes and trends in glacier area and volume in the Austrian Ötztal Alps (1969–1997–2006). The Cryosphere 3, 205–215. doi:10.5194 / tc-3-205-2009

Anonymous, 1983. Ergebnisse des österreichischen Eutrophieprogramms 1978-1982. BM Gesundheit- Umweltschutz, BM Wissenschaft und Forschung, Findruck, Wien.

Auer, I., Böhm, R., Mohnl, H., Potzmann, R., Schöner, W., Skomorowski, P., 2001a. ÖKLIM. Digitaler Klimaatlas Österreichs. Eine interaktive Reise durch die Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft des Klimas, in: Hammerl, C., Lenhardt, W., Steinacker, R., Steinhauser, P. (Eds.), Die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik 1851–2001: 150 Jahre Meteorologie und Geophysik in Österreich. Leykam, Wien.

Auer, I., Böhm, R., Dobesch, H., Koch, E., Lipa, W., Mohnl, H., Potzmann, R., Ragette, G., Svabik, O., 2001b. Klima von Vorarlberg. Eine anwendungsorientierte Klimatographie. Band II. Amt der Vorarlberger Landesregierung, Bregenz.

Auer, I., Jurkovic, A., Böhm, R., Schöner, W., Lipa, W., 2008. Erweiterung und Vervollständigung des StartClim Datensatzes für das Element tägliche Schneehöhe. Aktualisierung des existierenden StartClim Datensatzes (Lufttemperatur, Niederschlag und Dampfdruck) bis 2007 04 (Endbericht StartClim2007.A Teilprojekt von StartClim2007). Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), Institut für Meteorologie, Universität für Bodenkultur. Gefördert aus Mitteln des BMLFUW, des BMGFJ, des BMWF, der Österreichischen Hagelversicherung und der Verbund AHP, Wien.

Blaschke, A.P., Merz, R., Parajka, J., Salinas, J., Blöschl, G., 2011. Auswirkungen des Klimawandels auf das Wasserdargebot von Grund- und Oberflächenwasser. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 63, 31–41. doi:10.1007 / s00506-010-0273-3

Blöschl, G., Ardoin-Bardin, S., Bonell, M., Dorninger, M., Goodrich, D., Gutknecht, D., Matamoros, D., Merz, B., Shand, P., Szolgay, J., 2007. At what scales do climate variability and land cover change impact on flooding and low flows? Hydrological Processes 21, 1241–1247. doi:10.1002 / hyp.6669

Blöschl, G., Merz, R., 2008. Bestimmung von Bemessungshochwässern gegebener Jährlichkeit–Aspekte einer zeitgemäßen Strategie. Wasserwirtschaft 11, 12–18.

Blöschl, G., Montanari, A., 2010. Climate change impacts—throwing the dice? Hydrological Processes 24, 374–381. doi:10.1002 / hyp.7574

Blöschl, G., Viglione, A., Merz, R., Parajka, J., Salinas, J.L., Schöner, W., 2011. Auswirkungen des Klimawandels auf Hochwasser und Niederwasser. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 63, 21–30. doi:10.1007 / s00506-010-0269-z

Blöschl, G., Merz, R., Parajka, J., Salinas, J., Viglione, A., 2012. Floods in Austria, in: Kundzewicz, Z.W. (Ed.), Changes in Flood Risk in Europe. IAHS Press, Wallingford, pp. 169–177.

BMLFUW (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Hrsg.) 2007. Hydrologischer Atlas Österreichs. Österreichischer Kunst- und Kulturverlag, Wien.

BMLFUW (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Hrsg.), 2011. Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft. Studie der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik und der Technischen Universität Wien. Autoren: Schöner, W., Böhm, R., Haslinger, K. (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik), Blöschl, G., Kroiß, H., Merz, R., Blaschke, A. P., Viglione, A., Parajka, J., Salinas, J. L., Drabek, U., Laaha, G., Kreuzinger, N. (Technische Universität Wien), S.486, Wien. URL www.lebensministerium.at / dms / lmat / publikationen / bericht-langfassung / Anpassungsstrategien Klimawandel_Langfassung[1].pdf

Boeckli, L., Brenning, A., Gruber, S., Noetzli, J., 2012. Permafrost distribution in the European Alps: calculation and evaluation of an index map and summary statistics. The Cryosphere 6, 807–820. doi:10.5194 / tc-6-807-2012

Böhm, R., 2008. Schnee im Klimawandel – Snow and Climate Change. Katalog zur Ausstellung „Vom Schnee“ im Winter 2008 / 09 im Museum Kitzbühel 60–87.

Böhm, R., Godina, R., Nachtnebel, H.P., Pirker, O., 2008. Auswirkungen des Klimawandels auf die österreichische Wasserwirtschaft. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.

Bollmann, E., Sailer, R., Briese, C., Stötter, J., Fritzmann, P., 2011. Potential of airborne laser scanning for geomorphologic feature and process detection and quantifications in high alpine mountains. Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementary Issues 55, 83–104. doi:10.1127 / 0372-8854 / 2011 / 0055S2-0047

CC-Snow, 2013a. URL www.cc-snow.at (accessed 1.5.13).

CC-Snow, 2013b. URL http://www.klimawandelanpassung.at / index.php?id=4167 (accessed 1.5.13).

CC-WaterS, 2012. Climate Change and Impacts on Water Supply [WWW Document]. Outcomes and results of CC-WaterS pro-

ject. URL http://ccwaters.eu/index.php?option=com_content&view=frontpage&Itemid=1&56b00064c3e6beb26da3b96d1578b92a=9d4def25424f5065da6b39c81a5166b7 (accessed 1.5.13).

Chorus, I., Dokulil, M.T., Lammens, E., Manca, M., Naselli-Flores, L., Nixdorf, B., Persson, G., Schindler, D., Straile, D., Tátrai, I., Tadonléké, R., Willén, E., 2011. Restoration responses of 19 lakes: are TP thresholds common?, in: Chorus, I., Schauser, I. (Eds.), Oligotrophication of Lake Tegel and Schlachtensee, Berlin. Analysis of System Components, Causalities and Response Thresholds, Texte. Umweltbundesamt, Dessau, Germany, pp. 84–102.

Cogley, J.G., 2009. Geodetic and direct mass-balance measurements: comparison and joint analysis. Annals of Glaciology 96100.

Dalla-Via, A., 2008. Klimatische Entwicklungen und deren Auswirkungen auf die Wasserversorgung in der Oststeiermark, in: Böhm, R., Godina, R., Nachtnebel, H.P., Pirker, O. (Eds.), Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV), Wien, pp. 141–153.

Déqué, M., 2007. Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values. Global and Planetary Change 57, 16–26. doi:10.1016/j.gloplacha.2006.11.030

Dokulil, M.T., 2009. Abschätzung der klimabedingten Temperaturänderungen bis zum Jahr 2050 während der Badesaison. Österreichische Bundesforste AG.

Dokulil, M.T., 2014. Predicting summer surface water temperatures for large Austrian lakes in 2050 under climate change scenarios. Hydrobiologia 731, 19–29. doi:10.1007/s10750-013-1550-5

Dokulil, M.T., Donabaum, U., 2014. Phytoplankton of the Danube river: Composition and long-term dynamics. Acta Zoologica Bulgarica. Suppl. 7, pp. 147-152

Dokulil, M.T., Teubner, K., 2002. The spatial coherence of alpine lakes. Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie Verhandlungen 28, 1861–1864.

Dokulil, M.T., Teubner, K., 2005. Do phytoplankton communities correctly track trophic changes? An assessment using directly measured and palaeolimnological data. Freshwater Biology 50, 1594–1604. doi:10.1111/j.1365-2427.2005.01431.x

Dokulil, M.T., Teubner, K., 2011. Eutrophication and Climate Change: Present Situation and Future Scenarios, in: Ansari, A.A., Gill, S.S., Lanza, G.R., Rast, W. (Eds.), Eutrophication: Causes, Consequences and Control. Springer Netherlands, pp. 1–16.

Dokulil, M.T., Humpesch, T., Pöckl, U.H., Schmidt, R., 1993. Auswirkungen geänderter Klimaverhältnisse auf die Ökologie von Oberflächengewässer in Österreich, in: ÖAW, Kommission für Reinhaltung der Luft (Ed.), Bestandsaufnahme anthropogene Klimaänderungen: mögliche Auswirkungen auf Österreich - mögliche Massnahmen in Österreich; Dokumentation. Verlag der Österrrichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, pp. 5.1–5.82.

Dokulil, M.T., Schwarz, I., Jagsch, A., 2000. Die Reoligotrophierung österreichischer Seen; Sanierung, in: Bayr. LA Wasserwirtschaft (Ed.), Seen-Gewässerschutz, Nutzungen Und Zielkonflikte, Münchener Beiträge zur Abwasser-, Fischerei- und Flussbiologie. Oldenbourg Industrieverlag, pp. 307–321.

Dokulil, M.T., Teubner, K., Jagsch, A., 2006a. Climate change affecting hypolimnetic water temperatures in deep alpine lakes. Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie Verhandlungen 29, 1285–1288.

Dokulil, M.T., Jagsch, A., George, G.D., Anneville, O., Jankowski, T., Wahl, B., Lenhart, B., Blenckner, T., Teubner, K., 2006b. Twenty years of spatially coherent deepwater warming in lakes across Europe related to the North Atlantic Oscillation. Limnology and Oceanography 51, 2787–2793. doi:10.4319/lo.2006.51.6.2787

Dokulil, M.T., Teubner, K., Jagsch, A., Nickus, U., Adrian, R., Straile, D., Jankowski, T., Herzig, A., Padisák, J., 2010. The Impact of Climate Change on Lakes in Central Europe, in: George, G. (Ed.), The impact of climate change on lakes in central Europe, Aquatic Ecology Series. Springer Netherlands, pp. 387–409.

E-Control, 2011. Statistikbroschüre 2011. E-Control Austria, Wien.

Eder, G., Fuchs, M., Nachtnebel, H.-P., Loibl, W., 2005. Semi-distributed modelling of the monthly water balance in an alpine catchment. Hydrological Processes 19, 2339–2360. doi:10.1002/hyp.5888

Eisenreich, S.J., Bernansconi, C., Campostrini, P., De Ron, A., George, G., Heiskanen, A.-S., Hjorth, J., Hoepffner, N., Jones, K.C., Noges, P., Pirrone, N., Runnalls, N., Somma, F., Stilanakis, N., Umlauf, G., van de Bund, W., Viaroli, P., Vogt, J., Zaldivar, J.-M., Algieri, A., Beaugrand, G., Bidoglio, G., Blencjner, T., Bouraoui, F., Cinnirella, S., Vole, G., Cornell, S., Demuth, S., Dokulil, M.T., Giordani, G., Hedgecock, I., Lavelle, C., Marsh, T., Mostajir, B., Niemeyer, S., Nykjaer, L., Raes, F., Reynard, N., Straile, D., Thielen, J., Tomasin, A. & Trombino, G. 2005. Climate Change and the European Water Dimension. European Comm., Joint Res. Centre, EUR 21553, Ispra, Italy, pp.253.

Eitzinger, J., Kubu, G., Formayer, H., 2006. Impact of climate change on the water level of a shallow lake in eastern Austria, in: Hydrometeorological service of Republic of Macedonia: Conference on water observation and information systems for decision support (BALWOIS 2006), 23-26 May 2006. CD ROM, Ed. Ministry of Education and Science, Macedonia.

Eitzinger, J., Kubu, G., Thaler, S., 2008. Der Klimawandel und seine absehbaren Folgen für die Landwirtschaft, in: Böhm, R., Godina, R., Nachtnebel, H.P., Pirker, O. (Eds.), Auswirkungen Des Klimawandels Auf Die Österreichische Wasserwirtschaft. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV), Wien, pp. 197–200.

Eitzinger, J., Kubu, G., Thaler, S., 2010. Konsequenzen des Klimawandels für das Ertragspotenzial und den Wasserhaushalt landwirtschaftlicher Pflanzenproduktion, in: ÖWAV (Ed.), Auswirkungen Des Klimawandels Auf Hydrologie Und Wasserwirtschaft in Österreich. Präsentation Der Aktuellen Studien. Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, Wien, pp. 181–191.

Fank, J., 2012. Die Forschungsstation Wagna und deren Ergebnisse für Wasserwirtschaft und Landwirtschaft [WWW Document]. Festveranstaltung zum 20-jährigen Bestehen der Lysimeterstation Wagna. URL http://www.lysimeter.at/de?key=20_Jahre_Wagna (accessed 7.7.14).

Fank, J., Fuchs, K., 1999. Anwendung der Extremwertstatistik in der Hydrologie von Porengrundwasservorkommen. Mitt.blatt des Hydrografischen Dienstes in Österreich, 78, 31–45.

Fischer, A., 2013. Gletscherbericht 2011/12. Sammelbericht über die Gletschermessungen des Österreichischen Alpenvereins im Jahre 2012. Bergauf 2013, 22 – 27.

Fischer, A., Span, N., Kuhn, M., Massimo, M., Butschek, M., 2007. Radarmessungen der Eisdicke Österreichischer Gletscher, Band II: Messungen 1999 bis 2006. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), Wien.

Fischer, A., Markl, G., Kuhn, M., 2012. Glacier Mass Balance of Hintereisferner, Oetztal Alps, Austria, from 1952/53-2010/11.

Fliri, F., 1992. Der Schnee in Nord- und Osttirol 1895-1991. Universitätsverlag Wagner, Innsbruck.

Formayer, H., 2010. Prognostizierte Klimaveränderungen in Österreich: Unsicherheiten und Bias., in: ÖVAW (Ed.), Auswirkungen Des Klimawandels Auf Hydrologie Und Wasserwirtschaft in Österreich. Präsentation der aktuellen Studien. Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, Wien, pp. 25–34.

Formayer, H., Haas, P., 2010. Correction of RegCM3 model output data using a rank matching approach applied on various meteorological parameters, in: Deliverable D3.2 RCM Output Localization Methods (BOKU-Contribution of the FP 6 CECILIA Project). Wien, pp. 5–15.

Formayer, H., Hoftstätter, M., Haas, P., 2009. Untersuchung der Schneesicherheit und der potenziellen Beschneiungszeiten in Schladming und Ramsau (Endbericht zum Projekt STRATEGE No. BOKU-Met Report 11). Inst. für Meteorologie, Universität für Bodenkultur, Wien.

Frank, J., Fuchs, K., 1999. Anwendung der Extremwertstatistik in der Hydrologie von Porengrundwasservorkommen. Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich 78, 31–45.

Fricker, H., 1980. OECD Eutrophication Programme, Regional Project Alpine Lakes. Swiss Federal Board for Environmental Protection, Bern.

Fuchs, G., 2006. The hydrographic monitoring-network of the unsaturated zone in Austria (UZ-network), in: Kastanek, F., Kammerer, G. (Eds.), Soil physics and rural water management - progress, needs and challenges: Proceedings of the international symposium SOPHYWA, September 28-29, 2006. University of Natural Resources and Applied Life Sciences (BOKU), Vienna, pp. 189–195.

Fürst, J., Bichler, A., Konecny, F., 2011. Ermittlung extremer Grundwasserstände. Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich 87, 1–44.

Fürst, J., Nachtnebel, H.P., Kling, H., Hörhan, T., 2008. Trends in Niederschlag und Abfluss. Mitteilungsblatt des hydrographischen Dienstes in Österreich 85, 1–43. http://www.bmlfuw.gv.at/dms/lmat/wasser/wasser-oesterreich/wasserkreislauf/hydrographie_oesterreich/Mitteilungsblatt85/MB86/MB85.pdf

Gaigg, P., 1979. Reinhaltungsverband Mondsee. Kommunale Awasserwirtschaft im Mondseeland 1969 – 1979. Reinhaltungsverband Mondseeland, St. Lorenz.

Gardner, A.S., Moholdt, G., Cogley, J.G., Wouters, B., Arendt, A.A., Wahr, J., Berthier, E., Hock, R., Pfeffer, W.T., Kaser, G., Ligtenberg, S.R.M., Bolch, T., Sharp, M.J., Hagen, J.O., van den Broeke, M.R., Paul, F., 2013. A Reconciled Estimate of Glacier Contributions to Sea Level Rise: 2003 to 2009. Science 340, 852–857. doi:10.1126/science.1234532

Geist, T., Stötter, J., 2008. Documentation of glacier surface elevation change with multi-temporal airborne laser scanner data – case study: Hintereisferner and Kesselwandferner, Tyrol, Austria. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie 41, 77 – 106.

George, G., Nickus, U., Dokulil, M.T., Blenckner, T., 2010. The influence of changes in the atmospheric circulation on the surface temperature of lakes, in: George, G. (Ed.), The impact of climate change on european lakes, Aquatic Ecology Series. Springer Netherlands, pp. 293–310.

Global Change Atlas, 2009. Einzugsgebiet Obere Donau. GLOWA-Danube-Projekt. Department für Geographie, Ludwig-Maximilins-Universität, München.

Gmeiner, A., Loiskandl, W. (Eds.), 2010. Wasser in der Kulturlandschaft, in: Durst – die Europäische Quellwasser-konferenz: Interdisziplinäre Schnittstellen im Trinkwassersektor. Lit Verlag, Wien.

Godina, R., 2000. Überblick über Daten und Datenarchive im Hydrographischen Dienst für Österreich, in: Niederschlag-Abfluss Modellierung - Simulation und Prognose, Wiener Mitteilungen Band 164. Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Technische Universität, Wien.

Gusev, Y.M., Novak, O., 2007. Soil water - main water resources for terrestrial ecosystems of the biosphere. Journal of Hydrology and Hydromechanics 55, 3–15. doi:10.1002/hyp.362

Habersack, H., Holzmann, H., Koboltschnig, G., Pirker, O., 2006. Hitze- und Dürrefolgen für die Wasserwirtschaft Österreichs (Startclim 2004.D).

Hantel, M., Ehrendorfer, M., Haslinger, A., 2000. Climate sensitivity of snow cover duration in Austria. International Journal of Climatology 20, 615–640. doi:10.1002/(SICI)1097-0088(200005)20:6<615::AID-JOC489>3.0.CO;2-0

Hantel, M., Maurer, C., 2011. The median winter snowline in the Alps. Meteorologische Zeitschrift 20, 267–276. doi:10.1127/0941-2948/2011/0495, www.schweizerbart.de.

Hantel, M., Maurer, C., Mayer, D., 2012. The snowline climate of the Alps 1961–2010. Theoretical and Applied Climatology 110, 517–537. doi:10.1007/s00704-012-0688-9

Herzig, A., Bretschko, G., Colley, R., Dokulil, M., Gaviria, E., Holst, I., Humpesch, U., Kaiser, M., Kasimir, G., Leichtfried, M., Nausch, M., Petto, H., Schmid, P.E., Stipanits, B., Zoufal, W., 1989. Limnologische Veränderungen im Ökosystem Donau durch das Donaukraftwerk Altenwörth, in: Hary, N., Nachtnebel, H.P. (Eds.), Ökosystemstudie Donaustau Altenwörth. Univ.-Verl. Wagner, Innsbruck, pp. 95–121.

Hiebl, J., Reisenhofer, S., Auer, I., Böhm, R., Schöner, W., 2011. Multi-methodical realisation of Austrian climate maps for 1971–2000. Adv. Sci. Res. 6, 19–26. doi:10.5194/asr-6-19-2011

Hock, R., 2005. Glacier melt: a review of processes and their modelling. Progress in Physical Geography 29, 362–391. doi:10.1191/0309133305pp453ra

Hock, R., de Woul, M., Radić, V., Dyurgerov, M., 2009. Mountain glaciers and ice caps around Antarctica make a large sea-level rise contribution. Geophysical Research Letters 36, L07501. doi:10.1029/2008GL037020

Hofer, L., 2007. Klimatologie der Schneefallgrenze (Diplomarbeit). Universität Wien, Fach Meteorologie, Wien.

Hofstetter, G., 1954. Der Einfluss meteorologischer Faktoren auf die Temperatur alpiner Seen. Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, 146–181. doi:10.1007/BF02244620

Holzmann, H., Koboltschnig, G., 2010. Hydrologische Veränderungen in hochalpinen Einzugsgebieten, in: Auswirkungen des Klimawandels auf Hydrologie und Wasserwirtschaft in Österreich. Präsentation der aktuellen Studien. Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, Wien, pp. 60–71.

Holzmann, H., Lehmann, T., Formayer, H., Haas, P., 2010. Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf Hochwasser und Wasserhaushaltskomponenten ausgewählter Einzugsgebiete in Österreich. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 62, 7–14. doi:10.1007/s00506-009-0154-9

Humpesch, U.H., Dokulil, M., Elliott, J.M., Herzig, A., 1982. Ökologische Auswirkungen der thermischen Gewässerbeeinflussung. Österreichische Wasserwirtschaft 34, 122–136.

Huss, M., 2012: Extrapolating glacier mass balance to the mountain-range scale: the European Alps 1900-2100. The Cryosphere, 6, 713-727.

IPCC, 2007a. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth

Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC, 2007b. Climate Change 2007, The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA.

Jacob, D., Göttel, H., Kotlarski, S., Lorenz, P., 2007. Mögliche Klimaänderungen im Alpenraum, in: Klimawandel in den Alpen, Fakten – Folgen – Anpassung. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Berlin, pp. 22–27.

Jacob, D., Göttel, H., Kotlarski, S., Lorenz, P., Sieck, K., 2008. Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland - Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland (No. Forschungsbericht 204 41 138, UBA-FB 00096). Umweltbundesamt, Dessau.

Jacob, T., Wahr, J., Pfeffer, W.T., Swenson, S., 2012. Recent contributions of glaciers and ice caps to sea level rise. Nature 482, 514–518. doi:10.1038/nature10847

Jankowski, T., Livingstone, D.M., Bührer, H., Forster, R., Niederhauser, P., 2006. Consequences of the 2003 European heat wave for lake temperature profiles, thermal stability, and hypolimnetic oxygen depletion: Implications for a warmer world. Limnology and Oceanography 51, 815–819. doi:10.4319/lo.2006.51.2.0815

Jeppesen, E., Søndergaard, M., Jensen, J.P., Havens, K.E., Anneville, O., Carvalho, L., Coveney, M.F., Deneke, R., Dokulil, M.T., Foy, B., Gerdeaux, D., Hampton, S.E., Hilt, S., Kangur, K., Köhler, J., Lammens, E.H. h. r., Lauridsen, T.L., Manca, M., Miracle, M.R., Moss, B., Nõges, P., Persson, G., Phillips, G., Portielje, R., Romo, S., Schelske, C.L., Straile, D., Tatrai, I., Willén, E., Winder, M., 2005. Lake responses to reduced nutrient loading – an analysis of contemporary long-term data from 35 case studies. Freshwater Biology 50, 1747–1771. doi:10.1111/j.1365-2427.2005.01415.x

Jurković, A., 2008. Gesamtschneehöhe - Vergleichende Zeitreihenanalyse (Diplomarbeit). Universität Wien, Wien.

Jurković, A., Auer, I., Böhm, R., Debit, S., Orlik, A., Schöner, W., 2005. The new centennial snow initiative for the greater Alpine region (GAR). Status report and first results. Croatian Meteorological Journal 40, 601–603.

Kavka, G., Krämer, D., Kreitner, P., Mauthner-Weber, R., Ofenböck, G., Rauchbüchl, A., Rodinger, W., Siegel, P., Vekilov, M., 2000. Wasserbeschaffenheit der österreichischen Donau unter besonderer Berücksichtigung der langzeitlichen Entwicklung, Schriftenreihe des Bundesamtes für Wasserwirtschaft. Bundesamt für Wasserwirtschaft, Wien.

Kellerer-Pirklbauer, A., 2013. Ground surface temperature and permafrost evolution in the Hohe Tauern National Park, Austria, between 2006-2012: Signals of a warming climate?, in: Conference Proceedings of the Symposium for Research in Protected Areas, 10-12 June 2013. (in press).

Kling, H., 2006. Spatio-temporal modelling of the water balance of Austria. (Dissertation). Universität für Bodenkultur, Wien.

Kling, H., 2006. Spatio-temporal modelling of the water balance of Austria. Universität für Bodenkultur, Wien.

Kling, H., Fuchs, M., Paulin, M., 2012. Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. Journal of Hydrology 424–425, 264–277. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.01.011

Kling, H., Nachtnebel, H.P., Fürst, J., 2005a. Bilanzierungsgebiete, klimatische Wasserbilanz und Abflussverhältnisse. Kartentafel 7.1, in: Hydrologischer Atlas Österreichs. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.

Kling, H., Nachtnebel, H.P., Fürst, J., 2005b. Bilanzierungsgebiete, klimatische Wasserbilanz und Abflussverhältnisse - Water balance regions, climatic water balance and runoff characteristics, in: BMLFUW (Ed.), Hydrologischer Atlas Österreichs, 2. Lieferung, Karte 7.1. Österreichischer Kunst- und Kulturverlag, Wien.

Koboltschnig, G.R., Schöner, W., 2009. Modellierung der Eis-und Schneeschmelze in vergletscherten Einzugsgebieten. Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich 86, 93–107.

Koboltschnig, G.R., Schöner, W., 2011. The relevance of glacier melt in the water cycle of the Alps: the example of Austria. Hydrology and Earth System Sciences 15, 2039–2048. doi:10.5194/hess-15-2039-2011

Koboltschnig, G.R., Schöner, W., Holzmann, H., Zappa, M., 2009. Glaciermelt of a small basin contributing to runoff under the extreme climate conditions in the summer of 2003. Hydrological Processes. 23, 1010–1018. doi:10.1002/hyp.7203

KPC, 2012. Investitionskostenerhebung in der Siedlungswasserwirtschaft 2012-21. Lebensministerium, Wien.

Krainer, K., Lang, K., Mair, V., Nickus, U., Tessadri, R., Thies, H., Tonidandel, D., 2012. High Nickel concentrations in springs and permafrost ice of an active rock glacier at Lazaunalm, Ötztal Alps (South Tyrol, Italy). 8th International Conference Contaminants in Freezing Ground (CFG8), 22.-26. April, Obergurgl.

Krainer, K., Mostler, W., 2002. Hydrology of Active Rock Glaciers: Examples from the Austrian Alps. Arctic, Antarctic, and Alpine Research 34. doi:10.2307/1552465

Krainer, K., Mostler, W., Spötl, C., 2007. Discharge from active rock glaciers, Austrian Alps: a stable isotope approach. Austrian Journal of Earth Sciences 100, 102–112.

Krainer, K., Ribis, M., 2009. Blockgletscher und ihre hydrologische Bedeutung im Hochgebirge. Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich 86, 65–78.

Krainer, K., Ribis, M., 2012. A Rock Glacier Inventory of the Tyrolean Alps (Austria). Austrian Journal of Earth Sciences 105, 32–47.

Kranzl, L., Hummel, M., Matzenberger, J., Müller, A., Toleikyte, A., Totschnig, G., Schicker, I., Formayer, H., Gorgas, T., Stanzer, P., Nachtnebel, H.P., Bednar, T., Gladt, M., Neusser, M., 2014. Power through Resilience of Energy Systems: Energy Crises, Trends and Climate Change (PRESENCE). Austrian Climate Research Programme ACRP 3rd Call (Final Report, Austrian Climate Research Programme ACRP 3 rd Call No. B068675). Wien.

Krausmann, F., 2001. Rekonstruktion der Entwicklung von Materialflüssen im Zuge der Industrialisierung: Veränderungen im sozioökonomischen Biomassenmetabolismus in Österreich 1830 bis 1998, Schriftenreihe "Der europäische Sonderweg". Breuninger-Stiftung, Stuttgart.

Kresser, W., 1965. Österreichs Wasserbilanz. Österr. Wasserwirtschaft 17, 213–221.

Kresser, W., 1994. Wasserbilanz für das Österreichische Bundesgebiet 1961-90. Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich 72, 1–3.

Kreuzinger, N., Kroiß, H., 2011. Klimawandel, qualitative Aspekte der Wasserwirtschaft und Nutzungsaspekte. Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft 63, 42–51. doi:10.1007/s00506-010-0270-6

Kromp-Kolb, H., Eitzinger, J., Kubu, G., Formayer, H., Haas, P., Gerersdorfer, T., 2005. Auswirkungen einer Klimaänderung auf den Wasserhaushalt des Neusiedler Sees (Endbericht im Auftrag des Amtes der Burgenländischen Landesregierung Landeswasserbau-

bezirksamt Schützen am Gebirge vom 15. Juli 2005. BOKU-Met Report 1). Institut für Meteorologie, Universität für Bodenkultur, Wien.
Kuhn, M., 2008. Klimawandel und Gletscherschwund, in: Böhm, R., Godina, R., Nachtnebel, H.P., Pirker, O. (Eds.), Auswirkungen Des Klimawandels Auf Die Österreichische Wasserwirtschaft. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV), Wien, pp. 129–141.
Kuhn, M., Batlogg, N., 1999. Modellierung der Auswirkung von Klimaänderungen auf verschiedene Einzugsgebiete in Österreich, Schriftenreihe der Forschung im Verbund Band 46. Österreichische Elektrizitätswirtschaft-AG, Wien.
Kuhn, M., Lambrecht, A., 2007. Änderung von Gletschern im 20. Jahrhundert. Kartentafel 4.3, in: Hydrologischer Atlas Österreichs. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
Kuhn, M., Olefs, M., 2007. Auswirkung von Klimaänderungen auf das Abflussverhalten von vergletscherten Einzugsgebieten im Hinbllick auf Speicherkraftwerke (Endbericht StartClim 2007.E). Institut für Meteorologie und Geophysik, Universität Innsbruck, Wien.
Kuhn, M., Dreiseitl, E., Hofinger, S., Markl, G., Span, N., Kaser, G., 1999. Measurements and models of the mass balance of Hintereisferner. Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography 81, 659–670. doi:10.1111/1468-0459.00094
Kuhn, M., Lambrecht, A., Pop, I.-A., Patzelt, G., Gross, G., 2009a. Die Österreichischen Gletscher 1998 Und 1969: Flachen- und Volumenänderungen. Verlag der Österreichische Akademie der Wissenschaften, Wien.
Kuhn, M., Abermann, J., Olefs, M., Fischer, A., Lambrecht, A., 2009b. Gletscher im Klimawandel: Aktuelle Monitoringprogramme und Forschungen zur Auswirkungen auf den Gebietsabfluss im Ötztal. Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich 86, 31–48.
Lambrecht, A., Kuhn, M., 2007. Glacier changes in the Austrian Alps during the last three decades, derived from the new Austrian glacier inventory. Annals of Glaciology 46, 177–184. doi:10.3189/172756407782871341
Lauscher, F., 1993. Von der regionalen Verschiedenheit der Schneewinter in den Ostalpen. Eigenverlag.
Lieb, G.K., 1996. Permafrost und Blockgletscher in den östlichen österreichischen Alpen, in: Beiträge zur Permafrostforschung in Österreich, Arbeiten aus dem Institut für Geographie der Karl-Franzens-Universität. Graz, pp. 9–123.
Liepolt, R., 1957. Die Verunreinigung des Zeller Sees. Wasser und Abwasser 1957, 9–38.
Liepolt, R., 1965. Die Gewässergüte Österreichischer Seen. Österreichische Wasserwirtschaft 17, 5–9.
Liepolt, R., 1967. Die limnologische Verhältnisse des Zellersees, seine Verunreinigung und Reinigung. Förderung Europ. Gewässerschutz Informationsblatt 59–62.
Livingstone, D.M., 1993. Temporal structure in the deep-water temperature of four swiss lakes: a short-term climatic change indicator? Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Limnologie 25, 75–81.
Livingstone, D.M., 1997. An Example of the Simultaneous Occurrence of Climate-driven "sawtooth" Deep-water Warming/cooling Episodes in Several Swiss Lakes. Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Limnologie 26, 822–828.
Livingstone, D.M., Dokulil, M.T., 2001. Eighty years of spatially coherent Austrian lake surface temperatures and their relationship to regional air temperature and the North Atlantic Oscillation. Limnology and Oceanography 46, 1220–1227.
Livingstone, D.M., Lotter, A.F., Walker, I.R., 1999. The decrease in summer surface water temperature with altitude in swiss alpine lakes: a comparison with air temperature lapse rates. Arctic, Antarctic, and Alpine Research 31. doi:10.2307/1552583
Livingstone, D.M., Lotter, A.F., Kettle, H., 2005. Altitude-dependent differences in the primary physical response of mountain lakes to climate forcing. Limnology and Oceanography 50, 1313–1325.
Livingstone, D.M., Adrian, R., Arvola, L., Blenckner, T., Dokulil, M.T., Hari, R.E., George, G., Jankowski, T., Järvinen, M., Jennings, E., Nõges, P., Nõges, T., Straile, D., Weyhenmeyer, G.A., 2010a. Regional and supra-regional coherence in limnological variables, in: George, G. (Ed.), The Impact of Climate Change on European Lakes, Aquatic Ecology Series. Springer Netherlands, pp. 311–337.
Livingstone, D.M., Adrian, R., Blenckner, T., George, G., Weyhenmeyer, G.A., 2010b. Lake Ice Phenology, in: George, G. (Ed.), The impact of climate change on european lakes, Aquatic Ecology Series. Springer Netherlands, pp. 51–61.
Löffler, H., 1977. Men and Biosphere, No. 5, ICC-Vienna. Facultas, Wien.
Loiskandl, W., Klik, A., 1994. Long term field observations to estimate the soil water balance, in: Zannetti, P. (Ed.), Computer Techniques in Environmental Studies V.: Pollution Modeling. Vol. I. Computational Mechanics Publications, pp. 69–74.
Marke, T., 2008. Development and application of a model interface to couple regional climate models with land surface models for climate change risk assessment in the upper Danube watershed. Fakultät für Geowissenschaften, Ludwig-Maximilins-Universität, München.
Marzeion, B., Jarosch, A.H., Hofer, M., 2012. Past and future sea-level change from the surface mass balance of glaciers. The Cryosphere 6, 1295–1322. doi:10.5194/tc-6-1295-2012
McCombie, A.M., 1959. Some relations between air temperatures and the surface water temperatures of lakes. Limnology and Oceanography 4, 252–258.
Merz, R., Blöschl, G., Humer, G., 2008. Hochwasserabflüsse in Österreich – das HORA-Projekt. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 60, 129–138. doi:10.1007/s00506-008-0019-7
Merz, R., Parajka, J., Blöschl, G., 2011. Time stability of catchment model parameters: Implications for climate impact analyses: Time stability of catchment model parameters. Water Resources Research 47. doi:10.1029/2010WR009505
Mitchell, T.D., Jones, P.D., 2005. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. International Journal of Climatology 25, 693–712. doi:10.1002/joc.1181
Mohnl, H., 1994. Die Schwankungen der Neuschneehöhe und Schneedeckendauer in Österreich (Periode 1895-1992), in: 90.–91. Jahresbericht Des Sonnblickvereins für die Jahre 1992–1993. Eigenverlag des Sonnblickvereins, Wien, pp. 5–47.
Nachtnebel, H.P., Fuchs, M., 2004. Beurteilung der hydrologischen Veränderungen in Österreich infolge globaler Klimaänderungen. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 56, 79–92.
Nachtnebel, H.P., Hebenstreit, K., Diernhofer, W., Fuchs, M., 1999. Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf die Wasserkraftnutzung in alpinen Einzugsgebieten. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, Sonderdruck 51, 262–275.

Nachtnebel, H.P., Haberl, U., Stanzel, P., Kahl, B., Holzmann, H., Pfaffenwimmer, T., 2009. Hydrologische Abflussmodellierung - Teil 3, in: Hydrologisches Informationssystem Zur Hochwasservorhersage Im Land Salzburg (Hydris II). Amt der Salzburger Landesregierung, p. 341.

Nachtnebel, H.P., Stanzel, P., Pfaffenwimmer, T., 2010a. Report AP 3 Endbericht Hydrologie zu Klimadapt, in: Energie der Zukunft. Ableitung Prioritärer Maßnahmen zur Adaption des Energiesystems an den Klimawandel. EEG-Technische Universität, Wien.

Nachtnebel, H.P., 2010b. Auswirkungen von möglichen Klimaänderungen auf die Hydrologie und Wasserwirtschaft in einigen österreichischen Regionen, in: ÖWAV (Ed.), Auswirkungen des Klimawandels auf die Österreichische Wasserwirtschaft. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, pp. 27–52. http://www.google.at/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CB4QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.oewav.at%2FKontext%2FWebService%2FSecureFileAccess.aspx%3Ffileguid%3D%257Bca55095e-3fad-43d9-9f91-69a3834e9491%257D&ei=urHGU-mIOLPY0QW9u4GgDw&usg=AFQjCNFKOdET-niPaWgwNEEsjoFCZ_6pJQ&bvm=bv.71126742,d.bGQ

Nachtnebel, H.P., Stanzel, P., Büchinger, M., Steinacker, R., Aschauer, I., Lexer, A., Rudel, E., Krennert, T., Zingerle, C., 2010c. Trendanalyse von hydro-meteorologischen Extremwerten (No. Projekt A7.CP456 des Klima und Energiefonds). Klima- und Energiefonds.

Nachtnebel, H.P., Stanzel, P., Hernegger, M., 2012. Interner Bericht zu WP 4 (hydropower) und WP5 (cooling water demand): PRESENCE. Power through resilience of energy systems: Energy crises, trends and climate change (ARCP Projekt Koordination L. Kranzl). EEG-Technische Universität, Wien.

Neunteufel, R., Richart, L., Perfler, R., 2012. Wasserverbrauch und Wasserbedarf – Auswertung empirischer Daten zum Wasserverbrauch. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV), Wien.

Nickus, U., Thies, H., Krainer, K., Tessadri, R., 2012. Impact of active rock glaciers on high mountan stream water quality. 8th International Conference Contaminants in Freezing Ground (CFG8), 22.-26. April, Obergurgl.

Nobilis, F., Webb, B.W., 1994. Long-term water temperature behaviour in Austrian rivers. Mitteilungsblatt des hydrographischen Dienstes in Österreich 72, 4–22.

ÖVGW, 2008. Trinkwasser in Österreich [WWW Document]. ÖVGW Wasser. URL http://www.ovgw.at/wasser/themen/?uid:int=294 (accessed 12.6.13).

ÖWAV (Ed.), 2010. Auswirkungen des Klimawandels auf Hydrologie und Wasserwirtschaft in Österreich. Präsentation der aktuellen Studien. Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, Wien.

Parajka, J., Merz, R., Blöschl, G., 2005. Regionale Wasserbilanzkomponenten für Österreich auf Tagesbasis (Regional water balance components in Austria on a daily basis). Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 57, 43–56. doi:10.1007/BF03165611

Parajka, J., Kohnová, S., Merz, R., Szolgay, J., Hlavčová, K., Blöschl, G., 2009. Comparative analysis of the seasonality of hydrological characteristics in Slovakia and Austria / Analyse comparative de la saisonnalité de caractéristiques hydrologiques en Slovaquie et en Autriche. Hydrological Sciences Journal 54, 456–473. doi:10.1623/hysj.54.3.456

Parajka, J., Kohnová, S., Bálint, G., Barbuc, M., Borga, M., Claps, P., Cheval, S., Dumitrescu, A., Gaume, E., Hlavčová, K., Merz, R., Pfaundler, M., Stancalie, G., Szolgay, J., Blöschl, G., 2010. Seasonal characteristics of flood regimes across the Alpine–Carpathian range. Journal of Hydrology 394, 78–89. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.05.015

Patzelt, G., 1978. Der österreichische Gletscherkataster, in: Almanach 78 der Österreichischen Forschung. Verband d. wiss. Ges. Österr, Wien, pp. 129–133.

Patzelt, G., 1985. The period of glacier advances in the Alps, 1965 to 1980. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie 21, 403–407.

Pekarova, P., Halmova, D., Miklanek, P., Onderka, M., Pekar, J., Skoda, P., 2008. Is the water temperature of the Danube river at Bratislava, Slovakia, rising? Journal of Hydrometeorology 9, 1115–1122. doi:10.1175/2008JHM948.1

Perfler, R., Unterwainig, M., Formayer, H., 2006. Auswirkungen von Extremereignissen auf die Sicherheit der Trinkwasserversorgung in Österreich (Endbericht StartClim2005.A4). Institut für Siedlungswasserbau, Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz, Institut für Meteorologie, Universität für Bodenkultur, Wien.

Persson, I., Jones, I., Sahlberg, J., Dokulil, M., Hewitt, D., Lepparanta, M., Blenckner, T., 2005. Modelled thermal response of three european lakes to a probable future climate. Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie 29, 667–671.

Pfeffer, W.T., Arendt, A.A., Bliss, A., Bolch, T., Cogley, J.G., Gardner, A.S., Hagen, J.-O., Hock, R., Kaser, G., Kienholz, C., Miles, E.S., Moholdt, G., MöLg, N., Paul, F., Radic, V., Rastner, P., Raup, B.H., Rich, J., Sharp, M.J., 2014. The Randolph Glacier Inventory: a globally complete inventory of glaciers. Journal of Glaciology 60, 537–552. doi:10.3189/2014JoG13J176

Philipp, A., Bartholy, J., Beck, C., Erpicum, M., Esteban, P., Fettweis, X., Huth, R., James, P., Jourdain, S., Kreienkamp, F., Krennert, T., Lykoudis, S., Michalides, S.C., Pianko-Kluczynska, K., Post, P., Álvarez, D.R., Schiemann, R., Spekat, A., Tymvios, F.S., 2010. Cost733cat – A database of weather and circulation type classifications. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C 35, 360–373. doi:10.1016/j.pce.2009.12.010

Pöyry, 2008. Wasserkraftpotentialstudie Österreich (Endbericht. Erstellt im Auftrag des VEÖ). Pöyry Energy GmbH, Wien.

Prasch, M., 2010. Distributed process oriented modelling of the future impact of glacier melt water on runoff in the Lhasa river basin in Tibet (Dissertation). Fakultät für Geowissenschaften der Ludwig-Maximilians-Universität, München.

Prettenthaler, F., Dalla-Via, A. (Eds.), 2007. Wasser und Wirtschaft im Klimawandel: konkrete Ergebnisse am Beispiel der sensiblen Region Oststeiermark. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien.

Ragg, H., 2011. Tyrolean alps snow cover scenarios derived from a multisource calibrated degree-day snow model (Masterarbeit). Universität Innsbruck, Innsbruck.

Rauch, W., Kinzel, H., 2007. ÖKOSTRA - eine Datenbank zur Ausgabe von hochaufgelösten Niederschlagsserien aus Österreich, in: Haberl, R., Ertl, T. (Eds.), Wiener Mitteilungen, Kanalmanagement 2007 - Unterirdische Kanalisierung. Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, Universität für Bodenkultur, Wien.

Rogger, M., Chirico, G.B., Hausmann, H., Krainer, K., Brückl, E., Blöschl, G., 2013. Distributed hydrological modelling in a permafrost catchment - on the value of geophysical information. Geophysical Research Abstracts, EGU General Assembly 2013 15.

Rogger, M., Kohl, B., Pirkl, H., Hofer, M., Kirnbauer, R., Merz, R., Komma, J., Viglione, A., Blöschl, G., 2011. HOWATI – Hoch-Wasser Tirol – Ein Beitrag zur Harmonisierung von Bemessungshochwässern in Österreich. Österreichische Wasser-und Abfallwirtschaft 63, 153–161. doi:10.1007/s00506-011-0325-3

Rogger, M., Hausmann, H., Krainer, K., Brueckl, E., Bloeschl, G., 2012. On the use of geophysical information for distributed hydrological modelling in a mountain catchment. Geophysical Research Abstracts, EGU General Assembly 2012 14, 56–71.

Rohregger, J.B., 2008. Methoden zur Bestimmung der Schneefallgrenze (Diplomarbeit). Universität Wien, Fach Meteorologie, Wien.

Salinas, J.L., Viglione, A., Merz, R., Parajka, J., Schöner, W., Blöschl G., 2011. Wie ändern sich Hochwasser und Niederwasser in Österreich?, in: Blöschl, G., Merz, R. (Eds.), Hydrologie & Wasserwirtschaft - von der Theorie zur Praxis. Beiträge zum Tag der Hydrologie am 24./25. März 2011 an der Technischen Universität Wien. Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften Heft 30, Hennef, Deutschland.

Sampl, H., Schulz, L., Fresner, R., Reichmann, M., 2008. Zur Limnologie des Millstätter Sees, in: Golob, B., Hinsig-Erlenburg, W. (Eds.), Der Millstätter See. Aus Natur und Geschichte. Naturwissenschaftlicher Verein für Kärnten, Klagenfurt, pp. 65–84.

Sandner, U., 2004. Sustainable water management: Privatisierung der Wasserwirtschaft aus dem Blickwinkel der Nachhaltigkeit (Dissertation). Karl Franzens Universität, Graz.

Schartner, C., Kralik, M., 2011. Trends der Grundwassertemperatur: Untersuchungen von Daten der Überwachung des Gewässerzustandes in Österreich (REP-0328). Umweltbundesamt, Wien.

Schiller, G., Drexler, F., 1991. Die Wasserkraftnutzung in Österreich – Wasserkraftpotential Stand 1990. Österreichische Wasserwirtschaft 43, 1001–106.

Schneiderman, E., Järvinen, M., Jennings, E., May, L., Moore, K., Naden, P.S., Pierson, D., 2010. Modeling the effects of climate change on catchment hydrology with the GWLF Model, in: George, G. (Ed.), The impact of climate change on european lakes, Aquatic Ecology Series. Springer Netherlands, pp. 33–50.

Schöner, W., Mohnl, H., 2000. A new map of accumulated new snow of Austria. 26thInt. Conf. of Alpine Meteorology. CD-ROM. Österreichische Beiträge zur Meteorologie und Geophysik 23.

Schöner, W., Mohnl, H., 2003. Schneehöhen und Schneebedeckung, in: Hydrologischer Atlas Österreichs (HAÖ). Österreichischer Kunst- und Kulturverlag, Wien.

Schöner, W., Auer, I., Böhm, R., 2009. Long term trend of snow depth at Sonnblick (Austrian Alps) and its relation to climate change. Hydrological Processes 23, 1052–1063. doi:10.1002/hyp.7209

Schöner, W., Auer, I., Böhm, R., Mohnl, H., Potzmann, R., Skomorowski, P., 2001. Räumliche Modellierung von Klimaparametern aus Stationswerten mittels GIS. Österreichische Beiträge zur Meteorologie und Geophysik 27.

Schöner, W., Auer, I., Böhm, R., Thaler, S., 2003. Qualitätskontrolle und statistische Eigenschaften ausgewählter Klimaparameter auf Tageswertbasis im Hinblick auf Extremwertanalysen (Teilprojekt von StartClim "Startprojekt Klimaschutz: Erste Analysen extremer Wetterereignisse und ihrer Auswirkungen in Österreich"). Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien.

Schöner, W., Böhm, R., Haslinger, K., 2011. Klimaänderung in Österreich – hydrologisch relevante Klimaelemente. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 63, 11–20. doi:10.1007/s00506-010-0271-5

Shuter, B.J., Schlesinger, D.A., Zimmerman, A.P., 1983. Empirical predictors of annual surface water temperature cycles in North American lakes. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 40, 1838–1845. doi:10.1139/f83-213

Sivapalan, M., Blöschl, G., Merz, R., Gutknecht, D., 2005. Linking flood frequency to long-term water balance: Incorporating effects of seasonality. Water Resources Research 41, doi:10.1029/2004WR003439

Span, N., Fischer, A., Kuhn, M., Massimo, M., Butschek, M., 2005. Radarmessungen der Eisdicke österreichischer Gletscher, Band I: Messungen 1995 bis 1998. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), Wien.

Stanzel, P., Nachtnebel, H.P., 2010a. Wasserkrafterzeugung bei Klimaveränderungen, in: ÖWAV (Ed.), Auswirkungen des Klimawandels auf Hydrologie und Wasserwirtschaft in Österreich. Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, Wien, pp. 91–200.

Stanzel, P., Nachtnebel, H.P., 2010b. Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt und die Wasserkraftnutzung in Österreich. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 62, 180–187. doi:10.1007/s00506-010-0234-x

Steinacker, R., 1983. Diagnose und Prognose der Schneefallgrenze. Wetter und Leben. Zeitschrift für angewandte Meteorologie 35, 81–90.

Steinhauser, F., 1970. Die säkularen Änderungen der Schneedeckenverhältnisse in Österreich, in: 66.-67. Jahresbericht Des Sonnblick Vereins Für Die Jahre 1968-1969. Springer, Wien, pp. 3–19.

Steinhauser, F., 1976. Die Änderungen klimatischer Elemente in Österreich seit 1930, in: 72.–73. Jahresbericht des Sonnblick Vereines für die Jahre 1974–1975. Springer, Wien, pp. 11–32.

Stenitzer, E., Murer, E., Hösch, J., 2007. Zum Wasserverbrauch der Schwarzbrache im Trockengebiet am Beispiel des Marchfeldes, in: Bericht ALVA-Jahrestagung 2007: Gute Herstellungspraxis Für Pflanzliche Produkte, 21.-22. Mai 2007, Burg Schlaining. Arbeitsgemeinschaft für Lebensmittel- Veterinär- und Agrarwesen, Wien, p. 166.

Stocker-Waldhuber, M., Wiesenegger, H., Abermann, J., Hynek, B., Fischer, A., 2012. A new ALS glacier inventory of North Tyrol, Austria, for 2006. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie 43/44, 121–128.

Straile, D., 2002. North Atlantic Oscillation synchronizes food-web interactions in central European lakes. Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences 269, 391–395. doi:10.1098/rspb.2001.1907

Straile, D., Adrian, R., 2000. The north atlantic oscillation and plankton dynamics in two european lakes: two variations on a general theme. Global Change Biology 6, 663–670.

Straile, D., Jöhnk, K.D., Rossknecht, H., 2003. Complex effects of winter warming on the physicochemical characteristics of a deep lake. Limnology and Oceanography 48. doi:10.4319/lo.2003.48.4.1432

Straile, D., Eckmann, R., Jüngling, T., Thomas, G., Löffler, H., 2006. Influence of climate variability on whitefish (Coregonus lavaretus) year-class strength in a deep, warm monomictic lake. Oecologia 151, 521–529.

Strasser, U., Gobiet, A., Stötter, J., Kleindienst, K., Zimmermann, F., Steininger, K., Prettenthaler, F., 2011. Effects of climate change effects on future snow conditions, winter tourism and economy in Tyrol and Styria (Austria), CC-Snow, an interdisciplinary project, in: Proceedings of the "Managing Alpine Future 2011" Conference. Innsbruck.

Van der Linden, P., Mitchell, J.F.B. (Eds.), 2009. ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, Exeter, UK.

Vaughan, D.G., Comiso, J., 2013. Observations: Cryosphere, in Climate Change 2013, in: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (Eds.), The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA.

Webb, B.W., Nobilis, F., 1995. Long-term water temperature trends in Austrian rivers. Hydrological Sciences Journal 40, 83–96. doi:10.1080/02626669509491392

Webb, B.W., Nobilis, F., 1997. Long-term perspective on the nature of the air–water temperature relationship: a case study. Hydrological Processes 11, 137–147. doi:10.1002/(SICI)1099-1085(199702)11:2<137::AID-HYP405>3.0.CO;2-2

Webb, B.W., Nobilis, F., 2007. Long-term changes in river temperature and the influence of climatic and hydrological factors. Hydrological Sciences Journal 52, 74–85. doi:10.1623/hysj.52.1.74

Weber, M., Prasch, M., 2009. Einfluss der Gletscher auf das Abflussregime (des Einzugsgebiets der Oberen Donau) in der Vergangenheit und der Zukunft, Kapitel 3.1.4, in: Global Change Atlas. Einzugsgebiet Obere Donau. GLOWA-Danube-Projekt. München.

Weber, M., Prasch, M., Marowsky, K., Kuhn, M., Mauser, W., 2009. Die Zukunft der Gletscher an der Oberen Donau. Beitrag zur Nationalen GLOWA-Konferenz, 12.-14. Oktober 2009. Potsdam.

Wilcke, R.A.I., Gobiet, A., Mendlik, T., Themeßl, M.J., 2011. Multiparameter Error Correction and Downscaling of Regional Climate Models, in: EMS Annual Meeting Abstracts Vol. 8. pp. EMS2011–230.

Winkler, G., Kellerer-Pirklbauer, A., Pauritsch, M., Birk, S., 2012. Reliktische Blockgletscher - Grundwasserkörper in alpinen, kristallinen Einzugsgebieten. Beiträge zur Hydrogeologie 59, 105–122.

WPA Beratende Ingenieure, 2011. Evaluierung des Programmes LEO-13; Abschätzung der bewässerten und bewässerungsbedürftigen landwirtschaftlichen Flächen sowie Integration der Daten in INVEKOS Datenbank. Lebensministerium, Wien. http://www.google.at/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCcQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.bmlfuw.gv.at%2Fdms%2Flmat%2Fland%2Flaendl_entwicklung%2Fevaluierung%2Fle_studien%2Fflaechen%2F39_Bew-sserung-lw-Fl-Endbericht%2F39_Bew%25C3%25A4sserung%2520lw%2520Fl%2520Endbericht.pdf&ei=7rbGU52BEeq30QWV-YDICg&usg=AFQjCNHOCikYKyDeZZrxMXsCjc2BPxH0BQ&bvm=bv.71126742,d.bGQ

ZAMG, 2012. Klima / Informationsportal Klimawandel / Klimafolgen / Schnee. Webportal [WWW Document]. ZAMG Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. URL http://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimafolgen/schnee (accessed 12.26.12).

ZAMG, 2013. SNOWPAT [WWW Document]. ZAMG Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. URL http://www.zamg.ac.at/cms/de/forschung/klima/glaziologie/snowpat (accessed 5.12.13).

Band 2 Kapitel 3: Der Einfluss des Klimawandels auf die Biosphäre und Ökosystemleistungen

Volume 2 Chapter 3: Climate Change Impact on the Biosphere and Ecosystem Services

Koordinierende Leitautoren

Manfred J. Lexer, Wolfgang Rabitsch, Georg Grabherr

LeitautorInnen

Martin Dokulil, Stefan Dullinger, Josef Eitzinger, Michael Englisch, Franz Essl, Günter Gollmann, Michael Gottfried, Wolfram Graf, Gernot Hoch, Robert Jandl, Andreas Kahrer, Martin Kainz, Thomas Kirisits, Sigrid Netherer, Harald Pauli, Eugen Rott, Christa Schleper, Astrid Schmidt-Kloiber, Stefan Schmutz, Axel Schopf, Rupert Seidl, Wolfgang Vogl, Hans Winkler, Harald Zechmeister

Beiträge von

Johannes Gepp, Beatrice Grummer, Andreas Schindlbacher

Für den Begutachtungsprozess

Carsten Loose

Inhalt

ZUSAMMENFASSUNG

Dieses Kapitel behandelt die bereits beobachteten und potentiell möglichen Auswirkungen eines Klimawandels auf Organismen und Arten, Biozönosen und Ökosysteme in Österreich.

Klimawandelfolgen („impacts“) resultieren aus der jeweiligen artspezifischen Reaktion von Organismen auf die Klimaumwelt und den Wechselwirkungen mit anderen Arten bzw. dem jeweiligen Biotop. Für viele Artengruppen liegt sehr wenig Wissen für eine Klimafolgenabschätzung auf regionaler und lokaler Ebene vor. Studien zu Klimawandelfolgen für die Biosphäre in Österreich beschränken sich im Allgemeinen auf einige wenige Ökosysteme (u. a. Fließgewässer, Wälder, Ackerflächen) bzw. Sektoren (Forstwirtschaft, Landwirtschaft). Für den überwiegenden Teil der Biosphäre baut die Wissensbasis auf internationale Literatur bzw. auf erste Studien mit Pilotcharakter mit spezifischem Österreichbezug auf. Entsprechend groß ist die Unsicherheit, die aus teilweise unvollständigem Systemverständnis und fehlendem Bezug der dargestellten Klimawandelfolgen zu konkreten Klimawandelszenarios resultiert. Vor allem das Fehlen von Studien, die eine größere Anzahl von Klimawandelszenarios in Bezug auf ihre Auswirkungen systematisch analysieren, erschwert konkrete Aussagen zu möglichen bedeutsamen Schwellenwerten klimatischer Veränderungen.

Die meisten Pflanzenarten reagieren sensitiv in Bezug auf wärmere Temperaturen und Sommertrockenheit. Für viele andere Artengruppen, u. a. auch die Fauna, ist wenig Wissen zu deren Sensitivität in Bezug auf Temperatur- und Niederschlagsveränderungen vorhanden. Die komplexen ökosystemaren Interaktionen generieren Systemverhalten, dass äußerst schwer über längere Zeiträume abschätzbar ist. Generell ist jedoch von einer nicht-linearen Zunahme der Auswirkungen mit der Stärke des Klimawandels auszugehen. Zusammenfassend lassen sich u. a. folgende Klimawandelfolgen beispielhaft darstellen.

Agrarökosysteme und damit die landwirtschaftliche Produktion (Nutzpflanzen und Nutztiere) sind direkt und indirekt vom Klimawandel betroffen, da sich die standortbezogenen natürlichen Produktionsfaktoren stark verändern. Im topografisch stark gegliederten Österreich ergibt sich damit eine massive räumliche Verschiebung agrarklimatologischer Produktionszonen mit Konsequenzen für die standortübliche landwirtschaftliche Landnutzung und die Produktionstechnik. In kühleren, niederschlagsreicheren Gebieten, beispielsweise im nördlichen Alpenvorland, steigert wärmeres Klima weitgehend das durchschnittliche Ertragspotenzial von agrarischen Nutzpflanzen. In niederschlagsärmeren Gebieten nördlich der Donau sowie im Osten und Südosten Österreichs werden zunehmende Trockenheit und Hitze das durchschnittliche Ertragspotenzial, vor allem unbewässerter Sommerkulturen, langfristig verringern und die Ausfallsrisiken erhöhen. Das klimatische Anbaupotenzial wärmeliebender Nutzpflanzen, wie z. B. Körnermais oder Wein, weitet sich deutlich aus. Durch – zum Teil neu auftretende – wärmeliebende Insekten, Krankheiten und Unkräuter nimmt das Schadpotential im Ackerbau zu. Zunehmende Hitzeperioden können bei Nutztieren (Rinder, Schweine, Geflügel) die Leistung verringern, das Krankheitsrisiko erhöhen und bis zum Hitzetod führen.

In den österreichischen Waldökosystemen wird die Produktivität in Berglagen und in Regionen mit ausreichendem Niederschlag aufgrund der Klimaerwärmung zunehmen. In östlichen und nordöstlichen Tieflagen und in inneralpinen Beckenlagen nimmt sie hingegen aufgrund zunehmender Trockenperioden ab. Für die zukünftige Ökosystemdynamik wird ein intensiver werdendes Störungsregime aus abiotischen und biotischen Störungsfaktoren entscheidend werden. Insbesondere gilt dies für das Auftreten wärmeabhängiger Insekten wie z. B. dem Fichtenborkenkäfer. Zusätzlich ist mit neuartigen Schäden durch eingeschleppte oder aus südlicheren Regionen einwandernde Schadorganismen zu rechnen. Abiotische Störungsfaktoren wie etwa Stürme, Spät- und Frühfröste und Nass-Schneeereignisse oder Waldbrände könnten ebenfalls höhere Schäden als bisher verursachen. Diese Störungen können zudem Auslöser für Massenvermehrungen und Epidemien von bedeutenden forstlichen Schadorganismen wie z. B. von Fichtenborkenkäfern sein. Störungen führen zu geringeren Erlösen in der Holzproduktion. Auch die Schutzfunktion der Wälder etwa vor Steinschlag, Muren und Lawinen sowie die Kohlenstoffspeicherung können beeinträchtigt werden. Langfristig ist davon auszugehen, dass ab Temperaturerhöhungen über etwa 1 °C Laubbaumarten im Vergleich zu Nadelbaumarten konkurrenzkräftiger werden und in Seehöhen über 1 000 m ihren Anteil am Waldaufbau potentiell deutlich erhöhen könnten. Wie rasch und umfassend dies geschehen wird, ist von der Waldbewirtschaftung und der Größenordnung der klimatischen Veränderungen abhängig.

Moore und altholzreiche Wälder können sich nur langsam an den Klimawandel anpassen und sind deswegen stark gefährdet. Über die Wechselwirkungen mit anderen Faktoren des Globalen Wandels, wie Landnutzungsänderungen oder die Einbringung invasiver Arten, ist wenig bekannt. Die Anpassungskapazitäten der Arten und Lebensräume sind nicht ausreichend erforscht.

In alpinen Lagen können kälteangepasste Pflanzen in größere Höhen vordringen und dort eine Vermehrung der Ar-

tenvielfalt bewirken. In inselartigen Mikro-Nischen können kälteangepasste Arten trotz der Erwärmung überdauern, was mittelfristig zu einer Erhöhung der Artendiversität führen kann. Zunehmende Fragmentierung von Populationen kann jedoch zu lokalem Aussterben führen. Aus dem Hochgebirge stammende Arten in den niedrigeren Randlagen der Alpen sind davon besonders betroffen. Auch Tierarten sind stark betroffen. In der Tierwelt sind Änderungen im Jahresverlauf, wie die Verlängerung von Aktivitätsperioden, erhöhte Generationenfolge oder Vorverlegung der Ankunft von Zugvögeln sowie Arealverschiebungen nach Norden bzw. in höhere Lagen für einzelne Arten bereits dokumentiert. Der Klimawandel wird manche Tierarten, vor allem Generalisten, weiter begünstigen und andere, vor allem Spezialisten, gefährden. Die Erwärmung der Fließgewässer führt zu einer theoretischen Verschiebung der Fischhabitate um bis zu 30 km flussaufwärts. Quantitative Abschätzungen von regionalen faunistischen Veränderungen fehlen weitgehend.

SUMMARY

This Chapter presents the observed and potential future impacts of climate change on organisms, species, communities and ecosystems in Austria.

Climate change impacts result from the species specific response of organisms to climate stimuli and the interactions with other species and the biotope, respectively. For many species, knowledge on their sensitivity towards climatic changes and potential impacts is scarce. Available studies on climate change impacts on the biosphere in Austria are limited to a few ecosystems (e.g., river ecosystems, forests, agricultural land) and sectors, respectively (e.g., forestry, agriculture). For major parts of the biosphere, the knowledge is based on international studies or a few local and regional pilot studies, at best. Therefore, the uncertainty due to the limited knowledge about system behaviour, and frequently missing explicit references to specific climate change scenarios, is huge and makes concrete statements about likely impacts and possible „tipping points“ difficult. Most plant species respond sensitively to increasing temperatures and summer droughts. For many other species groups, including fauna, the impact of changes in precipitation and humidity in warmer climates is not well known. Complex interdependencies with feedbacks generate emerging system behaviours which are difficult to predict. It is to be expected that the severity of impacts is not linearly related to the severity of climate change. To summarize: Given the uncertainties discussed above, the following climate change impacts on biosphere and ecosystem services have been identified.

Agricultural systems and thus crop and livestock production are either directly or indirectly affected by climate change. For the complex topography of Austria, this translates into a substantial change in agricultural production zones with implications for agricultural land-use and production systems. In the cool and moist regions in the northern foothills of the Alps, a warmer climate will increase the crop yield potential, while in the drier regions north of the river Danube and in the southeastern parts of Austria, reduced precipitation and increasing number of heat days will negatively impact crop production. The spatial range for crops like corn and grapes will increase in a warmer climate; however, due to – partly emerging – insects, pathogens and weed plants, the risk of crop damage will increase. More frequent heatwaves may decrease dairy farming, pig fattening, poultry and cattle farming, increase risk of deseases and may even directly increase stress-related mortality.

In Austrian forests, biomass production will increase in mountains and regions with sufficient precipitation, while production will decrease at low-elevation sites in the east, north-east and in dry inner-alpine basins. Future forest dynamics will be largely driven by intensifying disturbance regimes, particularly due to poikilotherm insects such as spruce bark beetles. New invasive pest species and abiotic risk factors such as storms, early and late frost, snow breakage events and forest fires will further increase the damage from disturbances and may exhibit a positive feedback on bark beetle populations and trigger outbreaks of forest insects and severe epidemics of forest diseases. Disturbances lead to lower contribution margins in forestry, and negatively impact protection functionalities against gravitative natural hazards as well as the sink capacity of forests regarding in-situ carbon sequestration. In the long run, a temperature increase of more than 1 °C may result in markedly increased competitivity of broadleaved tree species over conifers. This may lead to higher shares of broadleaved species in forests at altitudes above 1 000 m.a.s.l. How fast this development happens will depend on forest management policies and the magnitude and pace of climate change.

Bogs and old growth forests can only adjust very slowly to a changing climate and are thus at high risk. Data on interdependencies with other factors of global change such as land-use change or the introduction of non-native species are scarce. In addition, the current knowledge on the adaptation capacity of species and ecosystems is insufficient. In alpine habitats, cold-adapted plants may move upwards and locally increase species diversity. Increasing landscape fragmentation may lead to the local extinction of some species. Animal species may adjust their activity profile to a warmer climate (e.g. migrating birds) or experience range shifts to the north or to

higher altitudes. Some generalist animal species will benefit from climate change while habitat specialists may be threatened. Warming of running waters may shift fish communities farther upstream.

KERNAUSSAGEN

In vielen Fällen sind österreichspezifische Studien zu Klimawandelfolgen wenig konkret in Bezug auf analysierte Klimawandelszenarios. Dies macht spezifische Aussagen zur Bandbreite möglicher Klimawandelauswirkungen und das Abschätzen von möglichen bedeutsamen Schwellenwerten für klimatische Veränderungen bzw. der Unsicherheit von Klimawandelfolgen schwierig.

- Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft sind regional unterschiedlich

In kühleren, niederschlagsreicheren Gebieten, beispielsweise im Nördlichen Alpenvorland, steigert wärmeres Klima weitgehend das durchschnittliche Ertragspotenzial von Nutzpflanzen. In niederschlagsärmeren Gebieten nördlich der Donau sowie im Osten und Südosten Österreichs werden zunehmende Trockenheit und Hitze das durchschnittliche Ertragspotenzial, vor allem unbewässerter Sommerkulturen, langfristig verringern und die Ausfallsrisiken erhöhen. Das klimatische Anbaupotenzial wärmeliebender Nutzpflanzen, wie z. B. Körnermais oder Wein, weitet sich deutlich aus. Das Schadpotenzial in der Landwirtschaft durch – zum Teil neu auftretende – wärmeliebende Insekten nimmt zu. Durch den Klimawandel verändert sich auch das Auftreten von Krankheiten und Unkräutern. Trockenschäden im Grünland können die Verunkrautung mit Wurzelunkräutern fördern (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage).

- Wärmeres und trockeneres Klima wird die Biomasseproduktivität der österreichischen Wälder stark beeinflussen

Die Produktivität nimmt in Berglagen und in Regionen mit ausreichendem Niederschlag aufgrund der Klimaerwärmung zu. In östlichen und nordöstlichen Tieflagen und in inneralpinen Beckenlagen nimmt sie hingegen aufgrund zunehmender Trockenperioden ab (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage).

- Die Störungen in Waldökosystemen nehmen unter allen diskutierten Klimaszenarien an Intensität und Häufigkeit zu

Insbesondere gilt dies für das Auftreten von Insekten wie z. B. Fichtenborkenkäfer. Zusätzlich ist mit neuartigen Schäden durch eingeschleppte oder aus südlicheren Regionen einwandernde Schadorganismen zu rechnen. Abiotische Störungsfaktoren wie etwa Stürme, Spät- und Frühfröste und Nass-Schneeereignisse oder Waldbrände könnten ebenfalls höhere Schäden als bisher verursachen. Diese Störungen können zudem Auslöser für Massenvermehrungen und Epidemien von bedeutenden forstlichen Schadorganismen wie Fichtenborkenkäfer sein. Störungen führen zu geringeren Erlösen in der Holzproduktion. Auch die Schutzfunktion der Wälder etwa vor Steinschlag, Muren und Lawinen sowie die Kohlenstoffspeicherung leiden (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage).

- Besonders vom Klimawandel betroffen sind Ökosysteme mit langer Entwicklungsdauer sowie Lebensräume der Alpen oberhalb der Waldgrenze

Moore und altholzreiche Wälder können sich nur langsam an den Klimawandel anpassen und sind deswegen besonders gefährdet (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage). Über die Wechselwirkungen mit anderen Faktoren des Globalen Wandels, wie Landnutzungsänderungen oder die Einbringung invasiver Arten, ist wenig bekannt. Die Anpassungskapazitäten der Arten und Lebensräume sind nicht ausreichend erforscht (mittlere Übereinstimmung, moderate Beweislage).

- In alpinen Lagen können kälteangepasste Pflanzen in größere Höhen vordringen und dort eine Vermehrung der Artenvielfalt bewirken

In inselartigen Mikro-Nischen können kälteangepasste Arten trotz der Erwärmung überdauern (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage). Zunehmende Fragmentierung von Populationen kann zu lokalem Aussterben führen. Aus dem Hochgebirge stammende Arten in den niedrigeren Randlagen der Alpen sind davon besonders betroffen (hohe Übereinstimmung, mittlere Beweislage).

- Auch Tierarten sind von klimatischen Veränderungen stark betroffen

In der Tierwelt sind Änderungen im Jahresverlauf, wie die Verlängerung von Aktivitätsperioden, erhöhte Generationenfolge oder Vorverlegung der Ankunft von Zugvögeln sowie Arealverschiebungen nach Norden bzw. in höhere Lagen für einzelne Arten bereits dokumentiert (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage). Der Klimawandel wird manche Tierarten, vor allem Generalisten, weiter begünstigen und andere, vor allem Spezialisten, gefährden (mittlere Übereinstimmung, mittlere Beweislage). Die Erwärmung der Fließgewässer führt zu einer theoretischen Verschiebung der Fischhabitate um bis zu

30 km flussaufwärts. Für Bachforelle und Äsche werden geeignete Lebensräume geringer (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage).

- Auch Nutztiere leiden unter dem Klimawandel

Zunehmende Hitzeperioden können bei Nutztieren die Leistung verringern, das Krankheitsrisiko erhöhen und bis zum Hitzetod führen (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage).

3.1 Einleitung
3.1 Introduction

3.1.1 Allgemeines

Dieses Kapitel behandelt die potentiellen Auswirkungen eines möglichen Klimawandels (siehe Band 1, Kapitel 4) auf Organismen, deren Biozönosen und in Erweiterung um Biotopaspekte die Auswirkungen auf Ökosysteme. In Anlehnung an das Millenium Ecosystem Assessment (MEA, 2005) wird als Ökosystem als ein dynamischer Komplex von Pflanzen, Tieren, Mikroorganismen und ihrer unbelebten Umwelt verstanden („… an ecosystem can be practically defined as a dynamic complex of plant, animal and micro-organism communities, and the non-living environment, interacting as a functional unit“). Damit wird ein weiter Bogen gespannt von stark anthropogen geprägten künstlichen Systemen (Ackerland, Grünland), bis zu naturnahen (Wälder, Wiesen) und natürlichen Ökosystemen (alpine Lebensräume, Moore).

Klimawandelfolgen ("impacts") resultieren aus der jeweiligen artspezifischen Reaktion von Organismen auf die Klimaumwelt und den Wechselwirkungen mit anderen Arten bzw. dem jeweiligen Biotop. Dieses Kapitel versucht, für die wichtigsten taxonomischen Artengruppen, aufbauend auf einer kurzen einleitenden Darstellung der ökosystemaren Relevanz, ihre Sensitivität in Bezug auf Klimafaktoren und, wenn möglich, die potentiellen Auswirkungen eines Klimawandels wie in Band 1, Kapitel 4 im Rahmen von Klimaänderungsszenarien für Österreich beschrieben, für österreichische Verhältnisse darzustellen (Abschnitt 3.2). Die sich aufgrund von Wechselwirkungen mit anderen Arten im ökosystemaren Kontext ergebenden Konsequenzen werden für wichtige Biozönosen bzw. Ökosysteme behandelt (Abschnitt 3.3). Schließlich wird versucht, für ausgewählte Ökosystemtypen (Wälder, agrarische Ökosysteme, Moore, Gewässer) die potentiellen Auswirkungen für die Erbringung von Ökosystemleistungen qualitativ abzuschätzen (d.h. Vulnerabilität; Abschnitt 3.4). Möglichkeiten zur Anpassung an einen Klimawandel sowie die Abschätzung der Effekte von Anpassungsmaßnahmen werden in Band 3, Kapitel 2 behandelt.

Unter der Sensitivität wird die Reaktion eines Systems (d.h. Art, Ökosystem) auf die Einwirkung von bestimmten Klimafaktoren verstanden. Lokal-regionale Klimawandelbedingungen bzw. Klimawandelszenarios bestimmen mit den Eigenschaften des betrachteten Systems die Exponiertheit („exposure“) und ergibt unter Einbeziehung der Sensitivität die potentiellen Klimawandelauswirkungen („impacts“) für ein betrachtetes System. Der Begriff der Vulnerabilität beschreibt zum einen, in welchem Umfang ein exponiertes sozial-ökologisches System gegenüber Störungen oder Stress empfänglich ist und zum anderen die eingeschränkten Möglichkeiten, mit diesen Herausforderungen umzugehen bzw. diese zu bewältigen. Wird nach O´Brien et al. (2004) Vulnerabilität im gegenständlichen Kontext als „starting point“ betrachtet (d.h. die Klimawandelauswirkungen unter der Annahme, dass noch keine Anpassungsmaßnahmen mitberücksichtigt wurden), charakterisiert der Begriff Vulnerabilität im Kontext des gegenständlichen Kapitels die (qualitative) Bewertung der potentiellen Klimawandelauswirkungen. Band 2, Kapitel 1 enthält weitere Hinweise zu den verwendeten Begriffen und Konzepten.

Literatur mit Österreichbezug konzentriert sich vor allem auf Wälder und alpine Pflanzengesellschaften, einige Fischarten und Flußökosysteme sowie allgemein die Sektoren Landwirtschaft und Forstwirtschaft. Es wurde jedoch der Ansatz verfolgt, sich nicht auf wenige, besser beforschte Ökosysteme bzw. Arten zu beschränken. Dies führte jedoch teilweise zu relativ inhomogenen Subkapiteln mit stark unterschiedlicher Wissensbasis. Als ebenfalls einschränkend für ein Assessment von Klimawandelfolgen in der Biosphäre hat sich der Umstand erwiesen, dass in vielen der für diesen Bericht ausgewerteten Quellen mit Österreichbezug unklar bleibt, auf welche klimatischen Veränderungen sich die beschriebenen Auswirkungen beziehen.

Für die Beurteilung von beobachteten Klimawandelfolgen sowie zur Abschätzung möglicher zukünftiger Auswirkungen eines Klimawandels ist von Bedeutung, dass dieses Konzept die „Neuformierung“ von Ökosystemen mit einschließt. Es kann nicht einfach davon ausgegangen werden, dass heute bestehende Artenvergesellschaftungen („communities“) unter veränderten Klimabedingungen gemeinsam eine neue Nische im ökologischen Raum einnehmen werden, sondern dass es zu neuen, heute nicht existierenden Artenkombinationen kommen kann (z.B. Austin und Smith, 1990). Verändern sich Ökosysteme unter dem Einfluss eines Klimawandels in Bezug

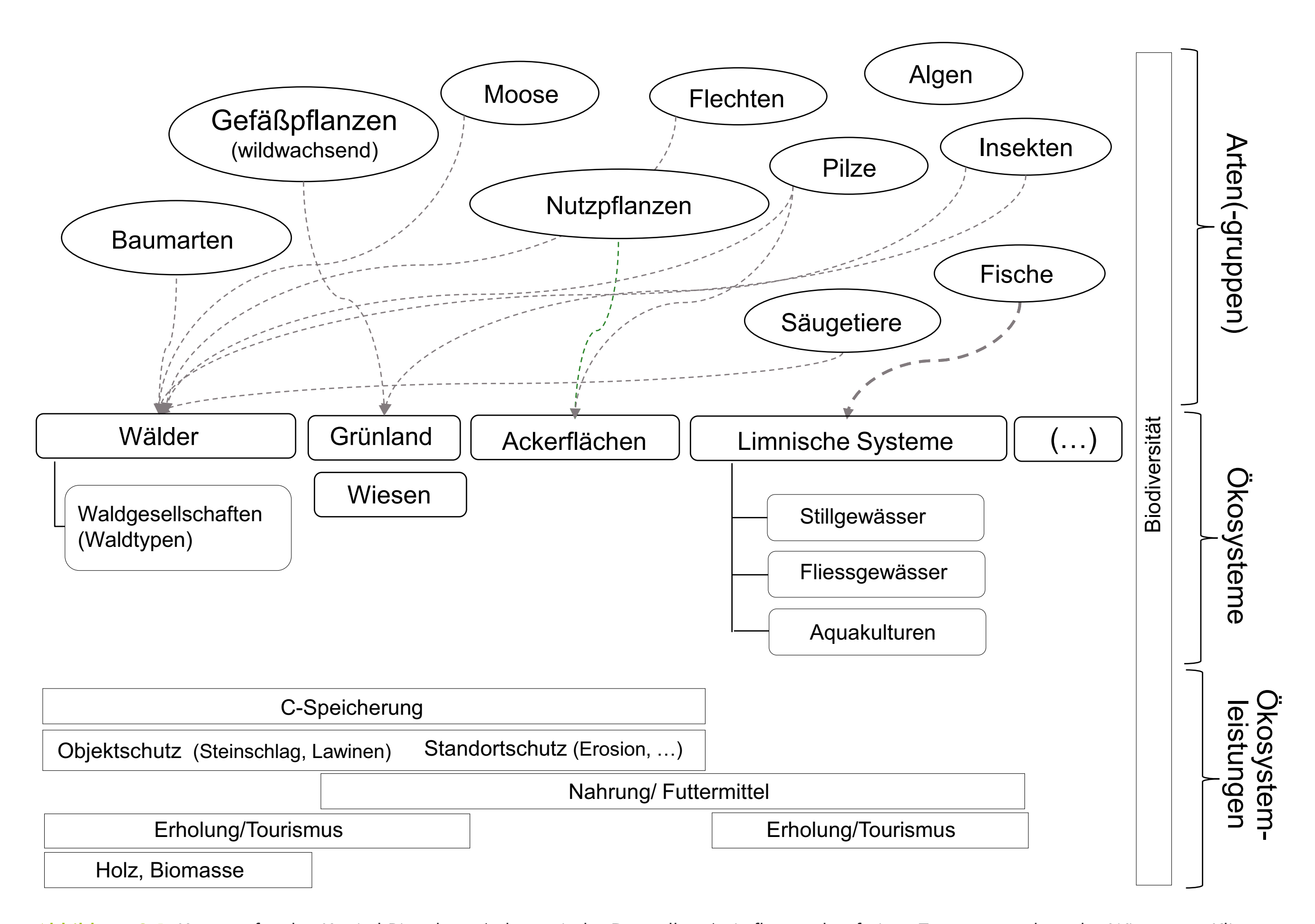


Abbildung 3.1 Konzept für das Kapitel Biosphäre (schematische Darstellung). Aufbauend auf einer Zusammenschau des Wissens zu Klimawandelfolgen für Arten bzw. Artengruppen werden Auswirkungen für Ökosysteme und ausgewählte Ökosystemleistungen in Österreich analysiert. Biodiversität wird als Voraussetzung für die Erbringung von Ökosystemleistungen betrachtet

Figure 3.1 Schematic representation of the conceptual frame for the Biosphere chapter. Based on a synthesis of species specific climate change impacts implications for ecosystems and related selected ecosystem services in Austria are discussed. Biodiversity is considered as prerequisite for the provisioning of ecosystem services

auf ihre Artenzusammensetzung bzw. Struktur (Raumstruktur, Biomasseverteilung) und Funktionsweise, hat das Auswirkungen auf die Ökosystemleistungen („ecosystem services" im Sinne des Millenium Assessment; MEA, 2005).

Diesem Konzept folgend gliedert sich das vorliegende Kapitel wie folgt: Für Arten (bzw. Artengruppen) wird vorhandenes Wissen zur Reaktion auf Klimafaktoren dargestellt. Darauf aufbauend werden, sofern Informationen aus der Literatur vorliegen, die für Österreich zu erwartenden Auswirkungen („impacts") in Bezug auf konkrete Klimawandelszenarien (vgl. Band 1, Kapitel 4) bzw. mögliche zukünftige Klimabedingungen auf Artenebene und auf Ebene von Ökosystemen (bzw. Biozönosen) abgeschätzt. Dabei wird auf die Kapitel zu Biotopaspekten (z. B. Hydrosphäre, Pedosphäre) in Band 2 verwiesen. Es wird versucht, die Überschneidung mit diesen Kapiteln so gering als möglich zu halten und im gegenständlichen Kapitel Arten und die sich durch Interaktionen zwischen Arten und Habitaten ergebenden Eigenschaften von Ökosystemen darzustellen.

Klimawandelauswirkungen können sich auf die Produktivität, auf Veränderungen des geografischen Vorkommens, auf das Verhalten, auf die Vergesellschaftung mit anderen Arten oder das Erlöschen von Vorkommen beziehen. Bei der Betrachtung der möglichen Implikationen für Ökosystemleistungen im Sinne des Millenium Assessment (MEA, 2005) fokussiert das vorliegende Kapitel auf bereitstellende Ökosystemleistungen („provisioning services"). Allgemein sind Analysen für österreichische Verhältnisse, die sich des Konzepts von Ökosystemleistungen bedienen, selten. Biodiversität bzw. deren Erhaltung wird als Voraussetzung für die Erbringung von Ökosystemleistungen betrachtet. Abbildung 3.1 zeigt schematisch das verfolgte Konzept.

3.1.2 Untersuchungsmethoden

Beobachtung und Experiment

Für die Identifizierung von (potentiellen) Klimawandelfolgen für die Biosphäre stehen als Methoden die Beobachtung, das Experiment sowie Modellbildung und Simulation zur Verfügung. Durch diese unterschiedlichen methodischen Zugänge ist wahlweise eine isolierte Betrachtung der Wirkungsweise einzelner Umweltfaktoren oder aber eine Analyse von Interaktionseffekten möglich. Mit bestehenden Monitoringsystemen, wie etwa permanenten Wald- oder Landschaftsinventuren, ist es kaum möglich, die Effekte von vielfach interagierenden Umweltfaktoren zu isolieren. Dies würde erfordern, dass erstens die Veränderungen eines beobachteten Systems wahrgenommen werden und zweitens zur Erklärung solcher Veränderungen ihre verursachenden Faktoren in vergleichbarer räumlich-zeitlicher Auflösung bekannt sein müssten. Als Beispiel seien hier die möglichen Auswirkungen des Klimawandels und der atmosphärische Stickstoffeintrag in terrestrischen Ökosystemen genannt. Klimaparameter lassen sich mit einiger Genauigkeit ausgehend von einem hinreichend dichten Messstationennetz in den geografischen Raum interpolieren. Der Eintrag von Stickstoff (N) in Ökosysteme lässt sich jedoch geografisch erst in vielfach gröberer Auflösung differenzieren (d. h. innerhalb einer Region wird unterstellt, dass die N-Einträge gleich hoch sind). Es ist hier kaum möglich, mit Beobachtung (z. B. Inventuren) aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. Mit Experimenten hingegen können die Wirkungen von Faktorenkombinationen gezielt überprüft werden. Der experimentelle Ansatz ist jedoch in Bezug auf die Zeit- und vor allem die Raumdimension der zu untersuchenden Ökoysteme stark eingeschränkt (z. B. Wälder).

Modellbildung und Simulation

Etwa seit den 1970er-Jahren werden Modellbildung und Simulation erfolgreich zur Systemanalyse angewendet. Neben der Durchführung virtueller Experimente ermöglichen Szenario-Simulationen auch die Abschätzung von Auswirkungen möglicher zukünftiger Klimabedingungen. Prinzipiell ist zu unterscheiden, ob es sich um Modelle für einzelne Arten oder für Gesellschaften („communities“) bzw. Ökosysteme handelt oder auch ob statische oder dynamische Modellansätze zum Einsatz kommen.

- Statische Nischen-Modelle

Minimalvoraussetzung für das Überleben einer Art an einem gegebenen Standort (Biotop) ist, dass die dort vorherrschenden Bedingungen innerhalb der artspezifischen physiologischen Amplitude liegen („fundamental niche“). Außerhalb dieses Bereichs ist eine Art nicht lebensfähig. Die Abgrenzung dieser physiologischen Nische berücksichtigt keine Interaktion mit anderen Arten (wie z. B. die Konkurrenz um Licht, Wasser, Nährstoffe). Die physiologischen Nischen von Arten sind über die tatsächlichen beobachteten Vorkommensbereiche schwierig zu bestimmen, da die meisten Arten natürlicherweise meist nicht bis an ihre physiologischen Toleranzgrenzen vorkommen. Die realisierte ökologische Nische ergibt sich durch die Konkurrenzwirkung von besser angepassten und konkurrenzkräftigeren Arten, wodurch viele Arten mehr oder weniger weit von ihren eigenen physiologischen Grenzen verdrängt werden. Zudem ist die realisierte Nische meist vielfach durch anthropogen bedingte Landnutzungseffekte überprägt.

Das Konzept der Nische wird vielfach in korrelativen Modellansätzen verwendet, um das Vorkommen einer Art oder die Vergesellschaftung von Arten in Abhängigkeit von Umweltfaktoren mathematisch-statistisch zu beschreiben (Guisan und Zimmermann, 2000; Guisan und Thuiller, 2005). Enthalten solche korrelativen Modelle auch Klimavariablen können die gefundenen Zusammenhänge zur Abschätzung der potentiellen Auswirkungen von klimatischen Veränderungen auf die Artenverbreitung verwendet werden. Während derartige Ansätze erste Einsichten in die Sensitivität von Arten bzw. Gesellschaften auf sich verändernde Klimabedingungen ermöglichen, müssen ihre methodischen Probleme berücksichtigt werden. Nischenmodelle sind statisch, d. h. es kann damit nicht abgeschätzt werden, wie lange es dauern würde, bis eine Art ein erwartetes künftiges Areal auch tatsächlich besiedeln könnte, bzw. wie lange es dauern würde, bis eine Art aus einem derzeitigen Habitat verdrängt wäre. Zusätzlich sind Nischenmodelle nicht imstande, die Veränderung von zwischenartlichen Konkurrenzverhältnissen zu berücksichtigen, was ihre Anwendung zur Abschätzung von Klimawandelfolgen äußerst unsicher macht.

- Dynamische Ökosystemmodelle

Dynamische Ökosystemmodelle, die Konkurrenz zwischen Arten in Abhängigkeit der Umweltbedingungen dynamisch über die Zeit beschreiben, können sehr gut zur Analyse von Klimawandelfolgen für Ökosysteme verwendet werden (z. B. Lexer und Hönninger, 2001; bzw. Seidl et al., 2011a für Waldökosysteme in Österreich). In Szenarioanalysen („Was wäre, wenn […]?“) werden Auswirkungen von klimatischen Verän-

derungen in der Regel transient simuliert, d. h. Änderungen in der Artenzusammensetzung sind nicht nur von Umweltbedingungen sondern auch von der Ausgangssituation und von dynamischen Prozessen über die Zeit abhängig (z. B. durch zwischenartliche Konkurrenz verursachte Veränderung der Baumartenzusammensetzung in Wäldern).

- Hybridansätze

Während Nischen- und dynamische Ökosystemmodelle eine längere Tradition haben und für die Simulation von Klimawandelfolgen mehr oder weniger direkt verwendbar sind, wurde das räumlich explizite Abschätzen von klimabedingten Wanderungsbewegungen lange Zeit eher vernachlässigt. Erst in den letzten Jahren hat sich, teilweise unter Rückgriff auf Ansätze der Invasionsbiologie (Hastings et al., 2005; Nathan et al., 2011), die Forschung in diesem Bereich mit der Entwicklung sogenannter Hybrid-Modelle (Thuiller et al., 2008) intensiviert. Hybrid-Modelle integrieren demographische Prozesse und Ausbreitungsfunktionen in Nischenmodellen (z. B. Engler et al., 2009; Dullinger et al., 2012). Ausbreitungsfunktionen in dynamischen Ökosystemmodellen (Meier et al., 2012; Lehsten et al., in Revision) erlauben die transiente Simulation der Arealdynamik von Arten unter sich ändernden klimatischen Bedingungen. Mit Ausnahme der Baumarten in Waldökosystemen fokussieren diese Modelle aber bislang auf Wanderungsbewegungen einzelner Arten und sind nicht in der Lage, simultane Migrationsbewegungen kompetitiv, trophisch oder mutualistisch interagierender Artengruppen zu simulieren.

- Kombinierte Methoden

Durch kombinierte Verfahren können Nachteile der einzelnen Methoden ausgeglichen werden. So ist etwa die Kombination von Großrauminventuren und Simulationsmodellen ein erfolgversprechender diagnostischer Ansatz (z. B. Hasenauer et al., 1999). Hier ist auch die Erweiterung bestehender Inventursysteme ein wichtiger Beitrag. Letztendlich sind im Wesentlichen alle derzeitigen großräumigen Monitoringverfahren nicht mit dem Ziel entwickelt worden, Klimawandeleffekte zu identifizieren. Ein Beispiel für ein gezielt auf diesen Zweck zugeschnittenes Verfahren stellt hingegen GLORIA dar (Gottfried et al., 2012), das Effekte des Klimawandels auf die Artenzusammensetzung in Hochgebirgshabitaten untersucht. Letztendlich sind zur Bestätigung sowohl Experiment als auch Simulation auf standardisierte Beobachtung (Monitoring) angewiesen.

3.2 Arten
3.2 Species

3.2.1 Mikroben (Archaea, Bakterien, Blaualgen)

Abgrenzung und Charakterisierung

Bakterien und Archaea sind weit verbreitet und wichtige Komponenten jedes terrestrischen oder aquatischen Ökosystems (z. B. Delong und Pace, 2001). Erst seit molekulare Techniken verwendet werden, anstatt die Organismen durch Kultivierung zu charakterisieren, ist die große Biodiversität von Bakterien und Archaea erkannt worden (Delong und Pace, 2001; Fierer et al., 2012). Sie besiedeln auch extreme Biotope, wie Salzseen und heiße Quellen, extrem nährstoffarme Habitate, wie etwa den Erdmantel und kommen in großer Zahl in und am menschlichen Körper sowie bei Tieren vor. Aufgrund ihrer großen metabolischen Diversität übernehmen viele verschiedene Gruppen von Bakterien und Archaea Schlüsselfunktionen in den globalen biogeochemischen Kreisläufen.

Klimawandelrelevante funktionale Rolle im ökosystemaren Kontext

Mikrobielle Gemeinschaften sind ein Schlüsselelement in vielen Ökosystemen, da sie an der Umsetzung anorganischen und organischen Materials in allen Nährstoffketten direkt und indirekt beteiligt sind. Ein Beispiel für die direkte funktionale Bedeutung von Bakterien und Archaea im Ökosystem ist ihre Bereitstellung von Stickstoffverbindungen für Pflanzen (sowohl Stickstofffixierung als auch Nitratbildung aus mineralisiertem Ammonium). Weiters sind Bakterien zusammen mit Pilzen die treibenden Kräfte beim Abbau organischen Materials im Boden (Peterson und Luxton, 1982), wobei hier bestimmte Organismengruppen zum Teil auf den Abbau bestimmter Pflanzenteile spezialisiert sind (Berg und McClaugherty, 2008) und sie tragen durch heterotrophe Atmung auch zum Netto-Kohlenstoffumsatz bei.

Bakterien und Archaea spielen eine direkte wichtige Rolle sowohl bei der Produktion als auch beim Abbau von Treibhausgasen (THG). Sie dominieren die natürliche und die anthropogen induzierte Produktion von Kohlendioxid, Methan und Lachgas. Photosynthetische Cyanobakterien und viele andere Bakterien, bzw. Archaea fixieren Kohlendioxid zum Aufbau eigener Materie aus der Atmosphäre (autotroph), während insbesondere Bodenbakterien beim Abbau von organischen

Kohlenstoffverbindungen CO_2 erzeugen (heterotroph). Bei der Oxidation von, aus abgestorbenem organischen Material mineralisiertem, Ammoniak zu Nitrat (durch bakterielle und archaeale Organismen) und bei der anschließenden Denitrifikation, bei welcher der Stickstoff zurück in die Atmosphäre überführt wird, entsteht Lachgas (N_2O) als Nebenprodukt (bei der Denitrifikation bis zu 50 kg je Tonne umgesetztem Stickstoff). Methanogene Archaea sind für die Bildung von etwa 75 % des Methans in der Atmosphäre verantwortlich, das hauptsächlich in Feuchtgebieten, im Verdauungssystem von Termiten und Wiederkäuern und in den Meeren produziert wird (Garcia et al., 2000). Methan wird aber auch von verschiedenen spezialisierten Archaea und Bakteriengruppen als Energiequelle genutzt, d. h. aktiv sowohl in anaeroben (unter Sauerstoffausschluss, z. B. in Meeressedimenten) als auch in aeroben Habitaten (Böden) abgebaut. Die Vermehrung und Aktivitäten von Denitrifikanten und methanbildenden (methanogenen) Archaea sind in den letzten Jahrzehnten durch intensivierte Landwirtschaft (Stickstoffdüngung, Tierhaltung) in Böden stark angestiegen (siehe Band 2, Kapitel 5 für detaillierte Ausführungen dazu).

Sensitivität in Bezug auf Klimavariable

Direkte Effekte auf Mikroorganismen sind z. B. durch Änderungen der Temperatur und Bodenfeuchte zu erwarten. Diese können entweder eine Veränderung in der Aktivität der bestehenden Mikrobiota oder/und eine Veränderung der Struktur der mikrobiellen Gemeinschaften verursachen. So kann Erwärmung direkt zu einer Erhöhung der mikrobiellen Aktivitäten führen und z. B. Bodenatmung und damit CO_2-Produktionsraten erhöhen. Diese Reaktion auf Erwärmung wurde z. B. in Bodenerwärmungsexperimenten in den Nord-Tiroler Kalkalpen bestätigt (Schindlbacher et al. 2011). Erhöhte CO_2-Konzentrationen wirken sich auf die Bodenmikrobiota eher indirekt über verändertes Pflanzenwachstum und -metabolismus (He et al., 2012) und die damit verbundenen Veränderungen im Boden (wie Bodenfeuchtigkeit und C:N-Verhältnis) aus.

Wenn ein Klimafaktor eine strukturelle Veränderung der mikrobiellen Gemeinschaft verursacht, so hat dies Auswirkungen auf Prozessraten und Kontrollmechanismen, da die neuen Mikroorganismen andere Physiologien aufweisen (Shimel und Gulledge, 1998). Im Extremfall könnte ein spezieller Prozess (z. B. Methanogenese) durch den Verlust einer bestimmten Organismengruppe wegfallen oder ein zuvor wenig relevanter Prozess durch Ausbreitung einer neuen funktionellen Gruppe hinzukommen (Smith et al., 2004). Im weitgehend naturbelassenen „Urwald“ Rothwald in den niederösterreichischen Kalkalpen wurden schnelle Veränderungen nitrifizierender und denitrifizierender Bodenpopulationen als Reaktion auf Änderungen im Bodenwassergehalt und der Temperatur gemessen (Szukics et al., 2010). Andererseits können verschiedene funktionell redundante Gruppen, wie z. B. Ammoniak-oxidierende Bakterien und Archaea, konträre Reaktionen auf sich ändernde Umweltbedingungen zeigen, wie dies für zwei österreichische Waldböden in einem Experiment mit variiertem Stickstoff- und Wassergehalt gezeigt wurde (Szukics et al., 2012; siehe auch Band 2, Kapitel 5) oder auch für Phytoplankton, das erhöhten Temperaturen ausgesetzt wurde.

Es lässt sich nicht vorhersehen, welches der beiden Reaktionsmuster unter welchen Klimaveränderungen am häufigsten auftreten wird. Jedoch lässt sich aus bisherigen ökophysiologischen Studien ableiten, dass sich die mikrobiellen Gemeinschaften strukturell umso stärker verändern, je stärker und langanhaltender die eintretende Umweltänderung ist, wobei insbesondere Änderungen des pH-Werts, der Temperatur- und der Sauerstoffverfügbarkeit wichtige Faktoren darstellen.

Klimawandelfolgen in Österreich

Die Effekte des Klimawandels auf Mikroorganismen sind aufgrund ihrer großen Zahl und teilweise extrem unterschiedlicher Stoffwechselprozesse und funktioneller Komplexität sowie der Interaktionen mikrobieller Gemeinschaften äußerst schwer abschätzbar. So bleibt unklar, ob und unter welchen Bedingungen eine Veränderung des Klimas eine positive oder negative Feedbackwirkung, z. B. auf THG-Emissionen haben wird (siehe dazu auch Band 2, Kapitel 5 zur Pedosphäre).

Mikrobielle Krankheitserreger werden auf Klimaveränderungen reagieren. So bergen künftige Temperaturerhöhungen die Gefahr ihrer verstärkten Ausbreitung, wie dies z. B. für den choleraähnlichen Erreger *Vibrio vulnificus* in der Ostsee gezeigt wurde (Baker-Austin et al., 2012).

3.2.2 Algen

Abgrenzung und Charakterisierung

Algen sind eine entwicklungsgeschichtlich diverse, sehr arten- und individuenreiche Gruppe niederer Pflanzen, die über einen Zeitraum von über 2 Mrd. Jahre der Erdgeschichte die dominierenden Pflanzen waren und die Entstehung der Erdatmosphäre gesteuert haben. Auch heute produzieren sie im Meer und in Binnengewässern noch ca. 50 % des Sauerstoffs der Atmosphäre (Falkowski, 2012). Sie sind zum überwiegen-

Tabelle 3.1 Sensitivität von Phytoplankton auf ausgewählte Klimavariablen

Table 3.1 Sensitivity of phytoplankton to selected climate drivers

Klimafaktor	Wirkungsmechanismus	Algenarten/funktionale Gruppen	Literatur
Höhere Temperatur	Besseres Wachstum durch höhere Netto-Photosynthese, da Temperatur-Optima noch nicht erreicht sind	Eurytherme Phytoplankter (insbes. Grünalgen, bzw. Cyanobakterien) werden bei Temperaturen über 18 °C gefördert; potentiell negative Auswirkung auf Kieselalgenwachstum	Kosten et al. (2011); Schabhüttl et al. (2010)
		Einwanderung wärmeliebender Cyanobakterien (*Cylindrospermopsis*) wird gefördert	Dokulil und Mayer (1996); Nöges et al. (2010)
	Verringertes Wachstum/Konkurrenzfähigkeit kalt-stenothermer Arten	Auswirkungen in kalten Gebirgsseen noch wenig erforscht (Beispiel kalt-stenotherme = psychrophile Dinoflagellaten)	Flaim et al. (2010); Obertegger et al. (2011)
Verkürzte Eisbedeckung	Frühjahrsdurchmischung intensiviert und verlängert; langzeitliche Erwärmung des Hypolimnions in tiefen Seen und Erhöhung der thermischen Stabilität; Steuerung durch Winter „North Atlantic Oscillation"	Thermische Änderungen beeinflussen Dauer und Zusammensetzung des Frühjahrspeaks (Diatomeen, Cryptophyceen) und fördern spätsommerliche Tiefen-Maxima von schwebenden toxischen Cyanobakterien (*Planktothrix rubescens*)	Bleckner et al. (2007); Dokulil et al. (2006); Dokulil und Teubner (2010, 2012); Dokulil et al. (2010); Koinig et al. (2002); Nöges et al. (2010)
Verlängerte Vegetationsperiode	Veränderung der räumlich-zeitlichen Nischen funktionaler Phytoplanktongruppen; komplexe Interaktion zwischen Nahrungsqualität von Algen und Grazern (herbivore Freßfeinde) gestört	Synchronisierung von Phytoplankton und Zooplanktonpeaks kann gestört werden; langzeitliche Änderung der Phytoplanktonzusammensetzung und Förderung von langsam wachsenden opportunistischen Cyanobakterien	Thies at al. (2011); Tolotti et al. (2012); Winder und Schindler (2004); Winder und Sommer (2012)
Verringerter Niederschlag im Sommer	Verringerung des DOC; höhere Lichtdurchlässigkeit führt zu verstärkter UV-Wirkung/-Schäden in Hochgebirgsseen	Insbesondere im Hochgebirgsphytoplankton und Nahrungsnetzen deutliche Auswirkungen auf das Artenspektrum	Koinig et al. (1998); Psenner (2002); Sommaruga et al. (1999)
Erhöhter Niederschlag (insbes. Starkregenereignisse im Sommer)	Erhöhter Nährstoffeintrag (P, N) aus dem Einzugsgebiet bewirkt Überdüngung (Eutrophierung), Starkregen erhöhen die Trübung	Verschiebung der Artendominanz zu eutrophen Taxa und maskierte Reoligotrophierung; u.a. zentrische Diatomeen werden gefördert	Dokulil und Teubner (2005); Dokulil et al. (2010) ; Koinig et al. (1998) ; Nöges et al. (2010); Tolotti et al. (2012)
Erhöhte diffuse Stoffeinträge aus Niederschlag	Stickstoff-Düngungseffekte auf Phytoplankton im Hochgebirge	Zeitlich verschobene Langzeiteffekte sind wahrscheinlich	Batterbee et al. (2002); Elser (2011); Holtgrieve et al. (2011)
Erhöhter CO_2-Gehalt in der Atmosphäre	Verbessertes Wachstum durch CO_2-Düngungseffekt, pH-Verringerung	Verringerte Diatomeendominanz; erhöhte Grünalgen-/Desmidiaceenanteile (CO_2-Verwerter), kombinierter Effekt mit UV in Hochgebirgsseen	Adrian et al. (2009); Batterbee et al. (2002); Beardall und Raven (2004); Beardall und Stojkovic (2006); Psenner (2002)

den Teil photoautotroph, d.h. sie betreiben Photosynthese, wobei sie Kohlenstoff aus CO_2 direkt oder intermediär (als gelöstes dissoziiertes Bikarbonat – HCO_3) aufnehmen und Sauerstoff freisetzen. Weltweit schätzt man ihre Artenzahl auf über 100 000, wovon derzeit ca. 3 000 Arten für Gewässer in Österreich nachgewiesen sind. Ihre Größe reicht im Plankton von wenigen Tausendstel zu wenigen Millimeter mit einer hohen Dichte (über 10^6 Individuen pro Liter) bzw. im Aufwuchs von wenigen Tausendstel Millimeter zu mehreren Zentimeter Größe (über 10^6 Individuen pro cm^2). Algen umfassen überwiegend eukaryontische Organismen (d.h. Zellen haben einen Zellkern) unterschiedlicher Pigmentierung (Farbgebung), sind aber meist mit oxygenen Photosynthese betreibenden Cyanobakterien (Blaualgen) assoziiert (in vielen Lebensräumen, insbesondere im Boden, auf Felsen, Baumstämmen und in Gewässern) und werden gemeinsam als Algengemeinschaften bezeichnet. Algengemeinschaften sind wesentlich für den Sauerstoffhaushalt und die Aufrechterhaltung der gewässertypischen Nahrungsnetze, spielen u.a. zusammen mit Pilzen eine wesentliche Rolle in Flechten und sind für die Bodenbildung relevant.

Tabelle 3.2 Sensitivität von Phytobenthos (Algenaufwuchs) in Fließgewässern in Bezug auf Klimavariablen

Table 3.2 Sensitivity of phytobenthos in rivers to selected climate drivers

Klimafaktor	Wirkungsmechanismus	Algenarten / funktionale Gruppen	Literatur
Höhere Temperatur	Besseres Wachstum durch höhere Netto-Photosynthese, da Temperatur-Optima noch nicht erreicht	Eurytherme Taxa (Grünalgen; Cyanobakterien; Rotalgen) werden gefördert; Algenmassenentwicklungen in unbeschatteten Gerinnen zu erwarten	Ellwood und Whitton (2007); Meyer et al. (1999); Schabhüttl et al. (2013)
	Verringertes Wachstum kaltstenothermer Arten	Beispiel *Hydrurus*-Nische, aber auch andere saisonale oligotrophe Arten	Klaveness und Lindstroem (2011); Rott et al. (2000, 2006); Uehlinger et al. (2011)
Verkürzte Frostperiode	Fehlende/Verkürzte Eis-/Schneebedeckung	Verlängerung von zeitlich-räumlichen Peaks insbesondere in Gletscherbächen in Frühjahr und Herbst	McGregor et al. (1995); Rott et al. (2006)
Auftauen von Permafrost	Auswaschung von Schwermetallen	Auswirkungen auf Algenaufwuchs	Thies et al. (2007); Koinig et al. (in Vorb.)
Rückschmelzen der Gletscher	Abschmelzen der Gletscher; Verringerung der Gletscherbachzonen (Kryal < 4 °C)	Rückgang der Gletscherbach-Algengemeinschaften (z.B. kryale Diatomeen	Jakobsen et al. (2012); Rott et al. (2010)
Verlängerung der Vegetationsperiode	Störung der Interaktionen zwischen Algennischen und herbivoren Insektenlarven („Grazer")	Makroalgen gefördert und Aufwuchs in Zusammensetzung verändert; Eutrophierung (Überdüngung)	Perkinsen et al. (2010); Uehlinger (2000)
Verringerter Niederschlag	Verringerte Erneuerung und Umlagerung der Bettsedimente	Verringerung der Diversitäts-/Mikrohabitatvielfalt (insbes. epilithische Formen in Bergbächen); Makroalgenmassenentwicklungen bei gleichzeitiger Temperaturerhöhung; Neophyten werden begünstigt	Coste und Ector (2000); Ellwood und Whitton (2007); Falasco und Bona (2013)
Erhöhter Niederschlag	Erhöhte Nährstoffauswaschung aus Feuchtgebieten – Anreichung DOC und organischer Phosphate im Frühjahr und Herbst; erhöhter Ferntransport von Nitraten	Massenentwicklung Phosphatasenbildender Taxa, Nitratanreichung bewirkt Verringerung von Stickstoff-Fixierern; verringerte biogene Kalkfällung durch pH-Verschiebung	Ellwood und Whitton (2007); Rott et al. (2012); Whitton und Neal (2011)
Starkregenereignisse im Sommer werden häufiger	Erhöhte Umlagerung der Bettsedimente, erhöhte anorganische Frachten	Abrieb der Bettsedimente bewirkt geringeres Algenwachstum, Selektion zu abrieb-resilienten Arten	Uehlinger (2000)

Klimawandelrelevante funktionale Rolle im ökosystemaren Kontext

Gewässeralgen stellen eine wesentliche Nahrungsgrundlage für kleintierische Organismen in Gewässern (insbesondere Zooplankton bzw. Zoobenthos) dar, die wiederum eine wesentliche Nahrungsgrundlage für Fische sind. Da die steuernden Bedingungen für Algen aus dem Phytoplankton (freies Wasser) und Algenaufwuchs (Gewässergrund) teils unterschiedlich sind, sollten die beiden Lebensgemeinschaften differenziert betrachtet werden (Meyer et al., 1999; Perkins et al., 2010; Tabelle 3.1 bzw. 3.2).

Für Niederungs-(=Tiefland-)Seen liegen sehr genaue Datenreihen und Modelle zu jahreszeitlichen Nischen und Abfolgen des Phytoplanktons vor (Adrian et al., 2009), die ganz wesentlich durch Temperatur und Mischungstiefe gesteuert werden. Algen im Hochgebirge sind zwar oft nur in geringen Mengen bzw. nur während kurzer Zeitperioden in größeren Mengen (Rott et al., 2006) vorhanden, stellen dennoch eine wesentliche Nahrungsgrundlage bzw. Lebensraum für benthische Zoozönosen dar. Algen im Hochgebirge reagieren empfindlich auf qualitative Veränderungen des Niederschlages (Ferntransport von Nährstoffen und Feinstaub; Stickstoffanreicherung) und sind gleichzeitig überwiegend oligotroph (benötigen nährstoffarme Bedingungen) und daher z. B. durch vermehrte Bildung von intra- bzw. extrazellulären Phosphatasen als Verwerter von organischen Phosphaten (Rott et al., 2000; Whitton und Neal, 2011) charakterisiert.

Sensitivität in Bezug auf Klimavariable

Aquatische Algenarten sind vergleichsweise gut erforscht und reagieren sowohl rasch als auch spezifisch auf Umweltänderungen. Daher sind Algengemeinschaften aus Gewässern für die

Tabelle 3.3 Beispiele von prognostizierten und bereits belegten Auswirkungen des Klimawandels auf pathogene Pilze an Waldbäumen (Desprez-Loustau et al., 2006; Engesser et al., 2008; La Porta et al., 2008; Lindner et al., 2008; Kliejunas et al., 2009; Jung et al., 2009; Sturrok et al., 2012). Quelle: Kirisits (2010), erweitert und verändert. Direkte oder indirekte Wirkung auf Krankheitserreger: (+) = positive Wirkung auf Pilze (höhere Krankheitsintensität), (–) = negative Wirkung auf Pilze (niedrigere Krankheitsintensität); KE = Krankheitserreger

Table 3.3 Examples of predicted and observed impacts of climate change on pathogenic fungi on forest trees (Source: Kirisits, 2010, extended and modified). (+) = positive impact on fungi (higher disease intensity on trees), (–) = negative impact on fungi (lower disease intensity on trees); KE = pathogenic organism

Klimaparameter	Wirkung (+/–)	Auswirkungen mit Beispielen
Klimawandel (generell)	+	Auftreten neuer KE durch Einschleppung und Arealausweitung
	+ –	Arealveränderungen von KE
	+ –	Direkter Einfluss auf Lebenszyklen von KE (Anzahl an Lebenszyklen / Jahr, Zyklendauer, Wachstums- und Überlebensraten, Phänologie, Sporulation, Infektionsbedingungen)
	+ –	Veränderung des Areals und der Widerstandsfähigkeit von Wirtsbäumen gegenüber KE
	+ –	Entstehung von Eintrittspforten für KE an ihren Wirtspflanzen (Wunden)
	+ –	Einfluss auf Antagonisten (Gegenspieler) von KE
	+ –	Einfluss auf Zwischenwirte und Alternativwirte von KE
	+ –	Einfluss auf Insekten als Überträger von KE
Höhere Temperaturen	+	Größere Wahrscheinlichkeit der Einschleppung/Etablierung gebietsfremder KE, v. a. auch aus wärmeren Klimazonen
	+	Horizontale und vertikale Arealausweitungen oder -verschiebungen heimischer (*Heterobasidion abietinum*), eingeschleppter (*Phytophthora cinnamomi* und andere *Phytophthora*-Arten, *Mycosphaerella dearnessii*, *Mycosphaerella pini*, *Giberella circinata*) und südeuropäischer KE (*Biscogniauxia mediterranea*, *Diplodia pinea*)
	–	Horizontale und vertikale Arealverkleinerungen, v.a. von kälteliebenden KE (*Gremmeniella abietina)*
	–	Geringere Befallshäufigkeit und -intensität durch kälteliebende Pilze und damit vermindertes Risiko von intensiven Epidemien (*Gremmeniella abietina*)
	+	Höhere Überlebensrate im Winter (*Phyophthora cinnamomi*)
	+	Direkter Einfluss auf Lebenszyklen von KE (Anzahl an Lebenszyklen / Jahr, Zyklendauer, Wachstums- und Überlebensraten, Phänologie, Sporulation, Infektionsbedingungen), z. B. Steigerung der Sporulation und Infektionshäufigkeit von *Heterobasidion* spp., erhöhte Rate der Freisetzung von Ascosporen bei *Cryphonectria parasitica*
	+	Verlängerung und Erhöhung der sporotrophen und parasitischen Aktivität bei höheren Temperaturen (v.a. außerhalb der Vegetationszeit), dadurch höhere Befallsintensitäten (viele KE; *Armillaria* spp., *Mycosphaerella pini*, *Phytophthora cinnamomi* und andere *Phytophthora*-Arten, *Gremmeniella abietina*)
	+	Höhere Befallsintensität der Holländischen Ulmenwelke (Erreger: *Ophiostoma novo-ulmi*) bei höheren Temperaturen (in künstlichen Inokulationsversuchen)
	+	Höhere Befallsintensität an flussbegleitenden Erlen durch *Phytophthora alni* bei höheren Wassertemperaturen
	+	Arealausweitung, schnellere Entwicklung und mehr Generationen / Jahr der Überträger (*Scolytus*-Arten, Ulmensplintkäfer) des Ulmenwelke-Erregers *Ophiostoma novo-ulmi*
	+	Schnellere Entwicklung und mehr Generationen / Jahr von rindenbrütenden Borkenkäfern (v.a. Buchdrucker [*Ips typographus*] an Fichte); dadurch indirekte Förderung assoziierter, von den Käfern übertragenen pathogenen Bläuepilzen (*Ophiostoma* spp., *Grosmannia* spp., *Ceratocystis* spp.)
	–	Förderung der Aktivität und Konkurrenzkraft des Riesen-Rindenpilzes (*Phlebiopsis gigantea*), eines Antagonisten von *Heterobasidion* spp.; dadurch möglicherweise Steigerung der Effizienz der biologischen Kontrolle des Wurzelschwamms (Behandlung der Baumstöcke nach der Fällung mit einer Sporensuspension von *Phlebiopsis gigantea*)
	–	Effektivere Übertragung des Hypovirulenz-Virus bei *Cryphonectria parasitica*

Klimaparameter	Wirkung (+/–)		Auswirkungen mit Beispielen
Höhere Niederschläge	+		Förderung der Sporulation, günstige Infektionsbedingungen, mehrere Lebenszyklen pro Jahr bei KE mit sekundären Krankheitszyklen (viele KE, u.a. Nadelpilze [z.B. *Mycosphaerella pini*, *Lophodermium seditiosum*, *Mycosphaerella laricina*, *Hypodermella laricis*, *Meria laricis* und viele andere], Blattpilze [*Apiognomonia errabunda*] Triebsterbenspilze [*Gremmeniella abietina*, *Hymenoscyphus fraxineus*] und *Phytophthora*-Arten)
	+		Größere Wahrscheinlichkeit der Einschleppung / Etablierung gebietsfremder KE
	+		Arealausweitungen oder -verschiebungen heimischer, gebietsfremder KE (*Mycosphaerella pini*) und südeuropäischer Arten
		–	Erhöhung der Widerstandsfähigkeit von Wirtsbäumen gegenüber KE
Geringere Niederschläge		–	Hemmung der Sporulation, ungünstige Infektionsbedingungen (viele KE)
Trocken- und Hitzeperioden	+		Schwächung der Wirtsbäume, erhöhte Anfälligkeit gegenüber KE bzw. raschere Ausbreitung von KE in Geweben bereits infizierter Bäume (viele KE, *Armillaria* spp., *Heterobasidion* spp., *Diplodia pinea*, *Cryptostroma corticale*, *Phytophthora* spp., *Phacidium coniferarum)*
	+		Prädisponierung lebender Bäume für den Befall durch rindenbrütende Borkenkäfer (v. a. Buchdrucker [*Ips typographus*] an Fichte); dadurch indirekte Förderung assoziierter, von den Käfern übertragenen pathogenen Bläuepilzen (*Ophiostoma* spp., *Grosmannia* spp., *Ceratocystis* spp.)
	+		Bei latenten KE Auslöser des Wechsels von endophytischem zu pathogenem Verhalten (z. B. *Diplodia pinea*, *Cryptostroma corticale*, *Cenangium ferruginosum*, *Apiognomonia quercina*, *Biscogniauxia nummularia*)
	+		Häufig Auslöser von Komplexkrankheiten unter Beteiligung pathogener Pilze (z. B. Eichensterben: *Armillaria* spp., *Phytophthora* spp., *Erysiphe alphitoides*)
Kürzere Schneebedeckung und geringere Schneehöhen	+		Erhöhte Infektionsrate von Stöcken durch *H. annosum* aufgrund verkürzter Zeiträume der Bedeckung der Stöcke mit Schnee
		–	Schnee als entscheidender epidemiologischer Faktor bei einigen Krankheitserregern in Hochlagen (Schneeschimmel-Pilze [*Herpotrichia juniperi*, *Neopeckia coulteri*, *Phacidum infestans*] sowie *Gremmeniella abietina* an *Pinus cembra*), Befallshäufigkeit und -intensität werden bei kürzerer Schneebedeckung und geringeren Schneehöhen in Zukunft sinken
		–	Geringere Häufigkeit und Intensität des Befalls von Fichten durch den Fichtennadelrost (*Chrysomyxa ledi* var. *rhododendri*) mittels indirekter Wirkung auf die Dikaryontenwirte (*Rhododendon* spp.); diese sind frostempfindlich und werden bei kürzeren Zeiträumen der Schneebedeckung im Gebirge vermehrt durch Frost geschädigt, wodurch auch der Rostpilz (überwinternde Teleutolager auf den Blättern der Alpenrosen!) geschädigt und der Infektionsdruck verringert wird
Häufigere und intensivere Sturm- und Schneebruchereignisse	+		Windwurfkalamitäten sind Schlüsselfaktoren für die Entwicklung von Borkenkäferepidemien (v. a. Buchdrucker [*Ips typographus*] an Fichte); auch Schneebruchereignisse können für deren Populationsdynamik von großer Bedeutung sein; dadurch indirekte Förderung assoziierter, von den Käfern übertragenen pathogenen Bläuepilzen (*Ophiostoma* spp., *Grosmannia* spp., *Ceratocystis* spp.)
	+		Schaffung von Eintrittspforten (Wunden) für KE (Wurzel- [*Heterobasidion* spp.] und Stammfäuleerreger [z. B. *Stereum sanguinolentum*])
	+		Schwächung der Wirtsbäume, dadurch erhöhte Anfälligkeit gegenüber KE bzw. raschere Ausbreitung von KE in Geweben bereits infizierter Bäume (*Heterobasidion* spp., *Armillaria* spp.)
Häufigere und intensivere Hagelereignisse	+		Schaffung von Eintrittspforten (Wunden) für KE (Erreger von Rindenerkrankungen und Baumkrebsen [*Diplodia pinea*, *Neonectria ditissima*, andere *Neonectria*- und *Nectria*-Arten], Stammfäule-Erreger [z. B. *Stereum sanguinolentum]*)
	+		Schwächung der Wirtsbäume, dadurch erhöhte Anfälligkeit gegenüber KE bzw. raschere Ausbreitung von KE in Geweben bereits infizierter Bäume (*Heterobasidion* spp., *Armillaria* spp.)
	+		Prädisponierung lebender Bäume für den Befall durch sekundäre rinden- und holzbrütende Insekten (v. a. Borkenkäfer, Bockkäfer, Holzwespen); dadurch indirekte Förderung assoziierter, von den Insekten übertragenen pathogenen Pilzen (Holzfäule-Erreger [*Amylostereum areolatum*, *Amylostereum chailletii*] und Bläuepilze [*Ophiostoma* spp., *Grosmannia* spp., *Ceratocystis* spp.])
Überschwemmungen	+		Förderung der Sporulation, günstige Infektionsbedingungen (*Phytophthora alni*, *Phytophthora* spp.)
	+		Schwächung der Wirtsbäume, erhöhte Anfälligkeit gegenüber KE (*Phytophthora alni*, *Phytophthora* spp., *Armillaria* spp.)

Bewertung von Auswirkungen des Klimawandels prinzipiell gut geeignet.

Die Sensitivität des Phytoplanktons in Bezug auf Temperaturerwärmung ist besonders gut abschätzbar (Nöges et al., 2010), obwohl andere steuernde Faktoren, insbesondere hydrologische Faktoren zeitweise von größerer Bedeutung sind (siehe Dokulil und Teubner, 2005; Thies et al. 2011; Band 2, Kapitel 2). Detaillierte Sensitivitäten für Plankton- und Aufwuchsalgen in Bezug auf ausgewählte Klimavariablen sind in Tabellen 3.1 und 3.2 überblicksweise dargestellt.

Klimawandelfolgen in Österreich

Klimaszenarien mit fortschreitender Temperaturerhöhung, steigenden maximalen Sommertemperaturen und verlängerten sommerlichen Trockenperioden (vgl. Band 1) können Veränderungen im Phytoplankton bewirken, die zum Teil bereits zu beobachten sind. In großen tiefen Voralpen- und Alpenseen ist bei langfristiger klimatischer Erwärmung und vor allem mit höheren sommerlichen Temperaturmaximalwerten die neuerliche Dominanz von toxinbildenden Cyanobakterien (wie vor der Abwassersanierung der Seen, siehe Dokulil und Teubner, 2012; Ostermayer et al., 2012) zu erwarten. Zunehmende Cyanobakterien-Massenentwicklungen sind besonders auch für die Spätsommer- und Frühherbstsituation in flachen Bereichen größerer Seen bzw. in kleineren Seen sehr wahrscheinlich (Beispiele dazu: u. a. Dokulil und Mayer, 1996; Fresner et al., 1998).

Im Hochgebirge nimmt zwar der Artenreichtum an Phytoplankton mit der Höhenlage ab (Stomp et al., 2011), gleichzeitig nimmt aber der Anteil spezifisch angepasster Arten in Plankton und Aufwuchs zu: insbesondere kalt-stenotherme Arten, die bisher noch wenig untersucht wurden, dominieren (Flaim et al., 2010; Klaveness und Lindstroem, 2011; Obertegger et al., 2011). Es ist zu erwarten, dass diese Arten mit zunehmender Wassererwärmung stark zurückgedrängt werden. Die Veränderungen durch Klimaerwärmung in Hochgebirgsseen sind vielfach mit komplexen Prozessen verbunden. So bewirkt verringerter Sommerniederschlag z. B. die Verringerung des DOC (dissolved organic carbon compounds) und eine Zunahme der UV Strahlung (Psenner, 2002; Sommaruga et al., 1999).

Da Langzeitdatensätze für das Hochgebirgs-Phytoplankton selten und die Auswirkungen oft von mehreren Faktoren gesteuert sind (Battarbee et al., 2002; Beardall und Stojkovic, 2006; Koinig et al., 1998; Psenner, 2002; Sommaruga-Wögrath et al., 1997; Sommaruga et al. 1999) ist der Einbezug von paläoökologischen Untersuchungen für die Erstellung von Prognosen von Auswirkungen verschiedener Klimaszenarien auf Algengemeinschaften als Stellvertreter für die Lebewelt unabdingbar (Battarbee, 2002). Jüngste paläolimnologische Untersuchungen der Diatomeen-Gesellschaften in alpinen Seen in den Niederen Tauern weisen darauf hin, dass die Einwanderung einzelner opportunistischer Arten bereits heute durch Klimaerwärmung begünstig wird, während die Reaktionen der heimischen Arten oft habitatspezifisch unterschiedlich ausfallen (Catalan et al., 2013; Weckström et al., in Vorb.).

Für Fließgewässer-Aufwuchsalgen in Niederungen sind neben Artverschiebungen durch Temperaturzunahme (Verdrängung von Kaltwasserformen) und CO_2 Anreicherung insbesondere hydrologische Veränderungen für den Nährstoffumsatz und die Steuerung von Nahrungsnetzen von Bedeutung (Uehlinger 2000, Tabelle 3.2). Dabei sollten insbesondere auch vermehrt Effekte der periodischen Austrocknung, wie diese für zentral- und südalpine Bereiche Österreichs prognostiziert werden, eine Rolle spielen. Da ökophysiologische Untersuchungen zu speziellen Nischen des Algenaufwuchses erst neueren Datums sind (Ellwood und Whitton 2007; Klaveness und Lindstroem, 2011; Rott et al., 2006; Rott et al., 2010, 2012; Uehlinger et al., 2011), liegen nur wenige Unterlagen für die Abschätzung von Klimawandelfolgen auf den Algenaufwuchs vor, wenn auch zum Teil ähnliche Veränderungen (z. B. Zunahme von Jochalgen) wie in arktischen Gebieten zu erwarten sind. Auf Grund der Spezifität der Lebewelt in schwach gepufferten Grundwasseraustritten und Quellen im Gebirge (Rott et al., 2010, Rott, unpubl. Daten) sowie die Zurückdrängung von Permafrostgebieten (u. a. von Blockgletschern) sind gravierende Auswirkungen auf die Artenzusammensetzung des Algenaufwuchses zu erwarten. Für Fließgewässer der Niederungen ist für Österreich vermehrte Einwanderung von opportunistischen Kieselalgen-Arten in Folge von Klimaerwärmung zu beobachten, wie das schon vielfach aus anderen Teilen Europas berichtet wurde (u. a. Coste und Ector, 2000).

3.2.3 Pilze und pilzähnliche Organismen

Abgrenzung und Charakterisierung

Pilze und pilzähnliche Organismen umfassen eine Reihe nicht näher miteinander verwandter, Gruppen eukaryontischer (das sind Lebewesen, deren Zellen einen Zellkern besitzen), kohlenstoffheterotropher (d. h. auf organische Kohlenstoffverbindungen, die von anderen Lebewesen oder von totem Substrat bezogen werden, angewiesene) Lebewesen (Dörfelt und Ruske, 2008; Krisai-Greilhuber und Kraus, 2013). Im engeren Sinne betrachtet man heute ausschließlich die Echten Pilze (*Fungi*), die einen einheitlichen Verwandtschaftskreis darstel-

len und ca. 100 000 beschriebene Arten umfassen, als Pilze. Der Großteil der Echten Pilze gehört zu den Abteilungen der *Ascomycota* (Schlauchpilze, inklusive der meisten anamorphen Pilze, von denen man kein geschlechtliches Stadium kennt; ca. 64 000 Arten weltweit) und *Basidiomycota* (Ständerpilze; ca. 31 000 Arten weltweit; vgl. Raven et al., 2000; Dörfelt und Ruske, 2008; Krisai-Greilhuber und Kraus, 2013). Von den verschiedenen Gruppen pilzähnlicher Organismen sind vor allem die *Oomyceten* (Eipilze, ca. 1 000 Arten weltweit), von denen zahlreiche Arten Krankheiten an Pflanzen und Bäumen und einige auch an Tieren verursachen, für den vorliegenden Band von Relevanz (Tabelle 3.3; z. B. *Phytophthora* spp.; Raven et al., 2000; Dörfelt und Ruske, 2008; Butin, 2011). Nach einer Abfrage vom 8. Mai 2013 umfasst der Datenbestand der „Datenbank der Pilze Österreichs" (Dämon und Krisai-Greilhuber, 2012; Österreichische Mykologische Gesellschaft [ÖMG], 2013) derzeit 8 000 Pilztaxa (praktisch ausschließlich Großpilze, deren Fruchtkörper mit freiem Auge erkennbar sind), wobei Basidiomyceten mit rund 65 % am häufigsten und Ascomyceten mit 27 % auch noch relativ häufig vertreten sind.

Funktionale Rolle im ökosystemaren Kontext

Nach ihrer Ernährungsweise und Rolle im Ökosystem lassen sich drei Gruppen von Pilzen unterscheiden: *Saprobionten, Parasiten und Symbionten* (Raven et al., 2000; Dörfelt und Ruske, 2008; Senn-Irlet et al., 2012).

- *Saprobionten* (Zersetzer, Destruenten) bauen abgestorbenes, organisches Material ab und sind daher von großer ökologischer Bedeutung (Dörfelt und Ruske, 2008). Sie führen „Abfälle", beispielsweise Totholz, Pflanzenreste und Tierkadaver, in den natürlichen Stoffkreislauf zurück und bilden damit wichtige Glieder in den Nahrungsketten. Pilze können praktisch alle von Lebewesen gebildeten Substanzen abbauen und halten damit die Stoffkreisläufe auf der Erde in Bewegung. Manche Substrate, beispielsweise Holz, werden praktisch ausschließlich von bestimmten, spezialisierten Pilzarten – vorwiegend Basidiomyceten – abgebaut (Butin, 2011). Pilze sind daher gemeinsam mit Bakterien die wichtigsten natürlichen Kohlenstoff-Quellen der Biosphäre und wichtige klimarelevante Systemelemente (Kauserud et al., 2012).
- *Parasiten* unter den Pilzen ernähren sich von der organischen Substanz lebender Organismen (Raven et al., 2000; Dörfelt und Ruske, 2008). Viele parasitische Pilze sind Krankheitserreger an Pflanzen und Tieren, die ihre Wirtsorganismen schädigen, oft sogar töten und dadurch enorme sozioökonomische Verluste verursachen. An Pflanzen und Bäumen sind sie die bedeutendste Gruppe von Pathogenen, sowohl hinsichtlich der Anzahl an Erregern als auch der Summe an Schädigungen und Verlusten, die sie verursachen (Butin, 2011). Sie sind daher ein wichtiger Teil der Störungsregime in natürlichen wie vom Menschen beeinflussten Ökosystemen und beeinflussen deren Dynamik. Durch die Schädigung ihrer Wirtspflanzen, die im Extremfall zu deren Absterben führen kann, beeinflussen sie indirekt den Kohlenstoffkreislauf der Erde.
- Eine besondere Gruppe von Parasiten sind *endophytische Pilze*, die zumindest eine Zeit lang Organe von Pflanzen besiedeln ohne Krankheitssymptome zu verursachen. Manche Krankheitserreger können längere Zeit, oft jahrelang, endophytisch in Pflanzengeweben ihrer Wirtspflanzen überdauern, ehe sie, zumeist ausgelöst durch extreme Witterungsereignisse, pathogenes Verhalten zeigen und ihre Wirte schädigen (Butin, 2011). Solche Erreger werden auch als latente Pathogene bezeichnet. Symbionten gehen mit anderen Organismen eine Lebensgemeinschaft ein, aus der beide Partner Nutzen ziehen (= mutualistische Symbiose). Die bekanntesten Symbiosen mit Pilz. B. teiligung sind die Flechten und die Mykorrhiza, die Vergesellschaftung von Pflanzenwurzeln mit Pilzen (Raven et al., 2000; Dörfelt und Ruske, 2008; Egli und Brunner, 2011; Senn-Irlet et al., 2012). Über 80 % aller bekannten Gefäßpflanzen, darunter die überwiegende Mehrzahl der Gehölze, sind mit Mykorrhizapilzen assoziiert. Mykorrhizapilze sind in terrestrischen Ökosystemen von hervorragender Bedeutung für die Effizienz der Wasser- und Nährstoffaufnahme von Pflanzen, beeinflussen ihr Wachstum und ihre Produktivität und damit auch ihre Rolle als Kohlenstoffspeicher (Egli, 2011; Egli und Brunner, 2011; Büntgen et al., 2012; Senn-Irlet et al., 2012).

Sensitivität in Bezug auf Klimavariable

So wie bei anderen Organismengruppen ist das Wissen über die Klimasensitivität von Pilzen fragmentarisch. Neben der Witterung werden Pilze durch andere Umwelteinflüsse wie Luftverschmutzung und Nährstoffeinträge sowie durch Habitatzerstörung (z. B. dem Fehlen von Alt- und Totholz in Waldökosystemen) stark beeinflusst. In Waldökosystemen wirken sich erhöhte Stickstoffeinträge etwa negativ auf Mykorrhizapilze aus, während die Anzahl an Pilzarten und die Menge an Fruchtkörpern nach einer Durchforstung stark ansteigen können (Egli, 2011; Senn-Irlet et al., 2012). Ein methodisches Problem bei der Analyse der Sensitivität von Pilzen in

Bezug auf klimatische Faktoren besteht darin, dass ihre Aktivität und ihr Wachstum zumeist nur indirekt abgeschätzt werden können. Das Vorkommen, die Häufigkeit, Aktivität und Phänologie von Großpilzen werden überwiegend aufgrund des Erscheinens und der Anzahl von Fruchtkörpern beurteilt (Büntgen et al., 2012; Kauserud et al., 2012), wenn man von pathogenen Arten, insbesondere Mikropilzen absieht, deren Auftreten in erster Linie aufgrund von Krankheitssymptomen und der Diagnose der Schädigungsursache dokumentiert werden kann (Kirisits, 2010; Butin, 2011).

Alle Pilze werden durch Witterungsfaktoren – vor allem Niederschläge und Temperatur – beeinflusst, entweder direkt oder indirekt. Obligate Parasiten (z. B. Rostpilze und Echte Mehltaupilze) und obligate Mykorrhizapilze, vor allem solche, die nur zusammen mit einer Wirtspflanze vorkommen, sind in ihren Lebenszyklen streng an ihre Wirte gebunden (Egli, 2011; Büntgen et al., 2012; Senn-Irlet et al., 2012). Klimabedingte Verschiebungen des Areals und der Häufigkeit ihrer Wirtspflanzen werden daher parallele Areal- und Häufigkeitsverschiebungen der assoziierten Pilze nach sich ziehen.

Klimatische Faktoren beeinflussen Pilzarten auch direkt, z. B. wirken sich Niederschlag und Temperatur maßgeblich auf die Bildung von Pilzfruchtkörpern aus. Während ausreichend hohe Niederschläge während der Pilzsaison eine Voraussetzung für die Fruchtkörperbildung sind, werden der Zeitpunkt und der Zeitraum des Auftretens von Pilzfruchtkörpern von der Temperatur gesteuert (Büntgen et al., 2012; Senn-Irlet et al., 2012). Bei der Analyse von saprotrophen und mykorrhizabildenen Pilzarten mit kurzlebigen Fruchtkörpern (Ordnungen *Agaricales*, *Boletales*, *Cantharellales* und *Russulales*) in Großbritannien und Nordirland, Norwegen, Österreich und der Schweiz wurde festgestellt, dass sich der Zeitraum der Fruchtkörperbildung bei vielen Pilzen von 1970 bis 2007 verlängert und innerhalb des Jahreskreislaufs (die Pilzsaison ist definiert von März bis Februar des Folgejahres) auf später verschoben hat (Kauserud et al., 2012). In einem Pilzreservat in der Schweiz wurde die Verschiebung der Pilzsaison im Zeitraum von 1975 bis 2006 auf insgesamt rund 12 Tage geschätzt (Senn-Irlet et al., 2012). Die Veränderung und Ausdehnung der Pilzsaison wird auf den Temperaturanstieg seit 1970 und der damit verbundenen Verlängerung der Wachstumsperiode der Pilzmycelien zurückgeführt. Darüber hinaus wird der verlängerte Zeitraum der Fruchtkörperbildung im Herbst und Winter durch den in allen vier Ländern beobachteten Trend des späteren Auftretens von Frost erklärt (Kauserud et al., 2012). In Süd-England wird ferner seit den 1970er Jahren beobachtet, dass manche Pilzarten während zweier Perioden im Jahr fruktifizieren, anstatt wie früher nur einmal jährlich (Gange et al., 2007), ähnliche Entwicklungen sind in Mitteleuropa bisher aber nicht dokumentiert.

In den letzten Jahren wurden wärmeliebende, seltene Pilzarten mit südeuropäischem Verbreitungsschwerpunkt, beispielsweise der Kaiserling (*Amanita caesarea*), vermehrt in Österreich gefunden (ÖMG, 2013). Viele Gebirgsarten, die an kühlere Klimabedingungen angepasst sind, scheinen dagegen seltener zu werden (I. Krisai-Greilhuber, persönliche Mitteilung). Diese pilzfloristischen Befunde können als bereits jetzt beobachtbare Auswirkungen einer Temperaturerhöhung interpretiert werden.

Pflanzenpathogene Pilze werden ebenfalls in vielfältiger Weise, direkt und indirekt, durch Witterungsfaktoren beeinflusst. Umweltfaktoren modifizieren den Grad der Anfälligkeit von Wirtsbäumen gegenüber Pathogenen und die Fähigkeit von Pathogenen ihre Wirte zu besiedeln und Krankheiten bei ihnen hervorzurufen. Dazu kommen häufig noch biotische Umweltfaktoren, beispielsweise Insekten als Überträger von Krankheitserregern oder Antagonisten, die Krankheitserreger hemmen und ebenfalls dem Einfluss von Klimaparametern unterliegen. Die Bedeutung von Klimafaktoren variiert stark, bei manchen Krankheiten, beispielsweise vielen Nadel-, Blatt-, Trieb-, Rinden- und Wurzelerkrankungen sind sie Schlüsselfaktoren bei der Entstehung einer Epidemie, bei anderen sind sie von geringerer Bedeutung (Desprez-Loustau et al., 2006; Kliejunas et al., 2009; Butin, 2011).

Klimawandelfolgen in Österreich

Da die Verbreitung und Häufigkeit von Pilzen maßgeblich von Klimafaktoren und jene von parasitischen Arten und Mykorrhizapilzen von ihren Wirtsbaumarten beeinflusst werden, sind lokale und regionale Veränderungen in der Pilzflora hinsichtlich des Auftretens und der Häufigkeit von Arten sowohl unter wärmer-feuchteren als auch unter wärmer-trockeneren Klimawandelszenarien wahrscheinlich. Es ist insgesamt mit einer Zunahme von wärmeliebenden und einem Rückgang von kälteliebenden Arten zu rechnen. Klimatisch bedingte Verschiebungen der Aktivität und des Wachstums von saprotrophen und mykorrhizabildenden Pilzen könnten große Änderungen der Kohlenstoff- und Mineralnährstoff-Kreisläufe sowie anderer Ökosystemprozesse nach sich ziehen, vor allen bei einem warm-feuchtem Klimwandelszenario (Büntgen et al., 2012; Kauserud et al., 2012). Diese Änderungen könnten noch größer sein, wenn auch holzzerstörende Pilze einbezogen werden. Aufgrund der gesteigerten Photosyntheseleistung ihrer Wirtspflanzen könnten Mykorrhizapilze vermehrt mit Kohlenstoffverbindungen versorgt werden, was bei Arten, die

Box 3.1: Eingeschleppte pathogene Pilze an Waldbäumen und Klimawandel
Box 3.1: Introduced pathogenic fungi on forest trees and climate change

Die potentiell hohe Anfälligkeit von Pflanzen und Bäumen auf gebietsfremde pathogene Pilze wird auf die fehlende Koevolution (d. h. die wechselseitige Anpassung zweier Arten über evolutionäre Zeiträume) mit den gebietsfremden Erregern zurückgeführt. Insgesamt ist zu erwarten, dass die Bedeutung eingeschleppter Krankheitserreger an Wald- und Zierbäumen in Zeiten des Klimawandels weiter zunehmen wird. Jüngstes Beispiel ist das seit 2005 in Österreich bekannte Triebsterben der Esche (Bild A), das von dem aus Asien eingeschleppten Schlauchpilz *Hymenoscyphus fraxineus* hervorgerufen wird. *Hymenoscyphus fraxineus* ist hitzeempfindlich, und die Krankheit wird durch hohe Niederschläge während der Sporulationszeit des Pilzes im Sommer gefördert. Bei einer Temperaturerhöhung und geringeren Niederschlägen während der Vegetationszeit wäre zu erwarten, dass der Infektionsdruck des Erregers zukünftig auf warm-trockenen Standorten zurückgeht. Bei wärmerer und feuchterer Witterung und insbesondere bei einer Erhöhung der Niederschläge während der Vegetationsperiode ist dagegen mit einer anhaltend hohen Krankheitsintensität zu rechnen, selbst unter der Annahme des häufigeren Auftretens von extremen Hitzeperioden im Sommer.

Auch *Ophiostoma novo-ulmi* ist ein aus Asien eingeschleppter aggressiver Krankheitserreger, der die Holländische Ulmenwelke (Bild B), eine tödliche Welkekrankheit, an Ulmenarten verursacht. Der Pilz wird durch Ulmensplintkäfer (*Scolytus* spp.) übertragen. Es ist zu erwarten, dass sich eine Temperaturerhöhung durch Arealausweitungen, schnellere Entwicklungszeiten und mehr Generationen pro Jahr positiv auf die Populationen der Käfer auswirkt. Dadurch sind eine effektivere Übertragung des Krankheitserregers durch die Käfer und vermehrt Infektion von Ulmen mit *Ophiostoma novo-ulmi* wahrscheinlich. Kleinflächige Vorkommen der Bergulme, die bisher kaum oder gar nicht durch die Ulmenwelke gefährdet sind, könnten in Zukunft verstärkt betroffen sein, wenn effektive Überträger, beispielsweise der Große Ulmensplintkäfer (*Scolytus scolytus*) in diese Gebiete einwandern.









Box 3.1 Abbildung 1A-D Beispiele von wichtigen Krankheiten an Waldbäumen, die von eingeschleppten oder möglicherweise eingeschleppten pathogenen Pilzen in Österreich verursacht werden (Namen der Erreger in Klammern): *A* Eschentriebsterben (*Hymenoscyphus fraxineus*), *B* Holländische Ulmenwelke (*Ophiostoma novo-ulmi*), *C* Dothistroma-Nadelbräune (*Dothistroma septosporum*) an Zirbe, *D* Diplodia-Kieferntriebsterben (*Diplodia pinea*) an Schwarzkiefer: Aus Kirisits (2010); Kirisits und Cech (2012)

Box 3.1 Figure 1A-D Examples for important deseases in forest tree species in Austria caused by introduced pathogenic fungi (desease organism in parentheses). *A* ash dieback (*Hymenoscyphus fraxineus*), B elm desease (*Ophiostoma novo-ulmi*), C Dothistroma-needle rust (*Dothistroma septosporum*) on *Pinus cembra*, D Diplodia-pine shoot dieback (*Diplodia pinea*) on *Pinus nigra.* From Kirisits (2010); Kirisits and Cech (2012)

Andere eingeschleppte Krankheitserreger an Waldbäumen werden in noch stärkerem Ausmaß von Witterungsfaktoren beeinflusst. Starker Befall durch die Dothistroma-Nadelbräune (Erreger: Dothistroma septosporum; z. B. an Zirben in Österreich [Bild C]), kann durch Perioden mit hohen Niederschlägen während der Vegetationszeit und durch eine Temperaturerhöhung in den letzten Jahrzehnten erklärt werden (Woods et al., 2005). Auslösender Faktor des Diplodia-Triebsterbens an

der Schwarzkiefer (Erreger: *Diplodia pinea*; Bild D) in Ostösterreich waren lang andauernde, seit 1990 wiederholt auftretende Trocken- und Hitzeperioden, welche Wirtsbäume schwächen und bewirken, dass sich der endophytisch bereits vorhandene Krankheitserreger in verschiedenen Pflanzengeweben ausbreiten und diese schädigen kann. Trockenstress der Wirtsbäume ist auch ein Schlüsselfaktor für verstärkt auftretende Schäden durch *Phytophthora*-Arten, beispielsweise an Rotbuche im und nach dem trockenen Jahr 2003.

zum Abbau von organischen Substanzen befähigt sind, eine Erhöhung der Zersetzungsraten und eine damit verbundene gesteigerte Freisetzung von CO_2 bewirken könnte (Kauserud et al., 2012). Ausschließlich saprotroph lebende Pilze können durch eine Steigerung und eine Verlängerung ihrer Aktivität ebenfalls vermehrt organisches Material abbauen und dadurch mehr CO_2 freisetzen (Kauserud et al., 2012). Die kürzlich klar dokumentierten Veränderungen der Aktivität und Produktivität von Pilzen sollten zukünftig bei der Abschätzung von Kohlenstoff-Bilanzen und anderer Ökosystemprozesse berücksichtigt werden (Büntgen et al., 2012; Kauserud et al., 2012). Die Initiierung von Experimenten zur Abschätzung solcher Effekte wäre wünschenswert.

Am Beispiel von Waldbäumen wird ersichtlich, dass forstpathologische Probleme oft überraschend auftreten, vor allem wenn Krankheitserreger eingeschleppt werden oder wenn bisher als nicht pathogen bekannte Arten aufgrund von geänderten Umweltbedingungen Krankheiten verursachen (siehe Box 3.1). Genaue Abschätzungen, welche Erreger von einer Temperaturerhöhung und anderen Klimawandelphänomenen profitieren werden, sind daher schwierig. Tabelle 3.3 listet Beispiele von prognostizierten und bereits belegten Auswirkungen des Klimawandels auf pathogene Pilze mit Fokus auf Waldbäume auf. Bei einem wärmeren und feuchteren Klima sind vor allem direkte positive Auswirkungen auf pathogene Pilze über verbesserte Sporulations- und Infektionsbedingungen zu erwarten. Bei einem wärmeren und trockeneren Klima wäre dagegen, zumindest zwischenzeitlich, mit vermehrtem Stress und mit einer Abnahme der Widerstandsfähigkeit der Wirtsbaumpopulationen gegenüber biotischen Schädigungsfaktoren zu rechnen, wovon vor allem Schwächeparasiten und latente Pathogene profitieren würden. Trocken- und Hitzeperioden haben einen ähnlichen Effekt. Ihre Häufigkeit, Intensität und Dauer in einem sich wandelnden Klima sind aber schwer abschätzbar (vgl. Band 1, Kapitel 4). Das Gleiche gilt für andere Extremereignisse (Sturm- und Schneebruch, Hagel und Überschwemmungen). Da Niederschläge zukünftig vermehrt als Regen und weniger häufig als Schnee auftreten werden, sind negative Auswirkungen auf pathogene Pilze, die direkt oder indirekt auf Schnee angewiesen sind, wahrscheinlich. Indirekte Auswirkungen des Klimawandels auf Krankheitserreger über die Einwirkung auf Antagonisten sind sehr schwer abschätzbar, da ökologische Zusammenhänge und Wechselwirkungen nur beispielhaft bekannt sind. Überträger von pathogenen Pilzen, bei denen es sich zumeist um Insekten handelt, dürften aber bei beiden Szenarien, wärmer-feuchter und wärmer-trockener, gefördert werden.

Insgesamt ist davon auszugehen, dass pathogene Organismen ein höheres Migrations- und Anpassungspotential an eine sich rasch ändernde Umwelt besitzen als ihre langlebigen Wirtsbaumarten. Auch Pilzkrankheiten an Tieren werden durch den Klimawandel gefördert (siehe Box 3.7). In Abschnitt 3.2.9 werden Pilzkrankheiten in der Landwirtschaft nochmals kurz aufgegriffen.

3.2.4 Moose

Abgrenzung und Charakterisierung

Moose stehen stammesgeschichtlich zwischen den Algen und den Gefäßpflanzen, es handelt sich dabei aber um keine einheitliche Verwandtschaftsgruppe. Sie werden in drei Gruppen gegliedert (Vanderpoorten und Geoffinet, 2009): Die Hornmoose (*Anthoceratophyta*), welche zu den allerersten Landpflanzen zählten, die Lebermoose (*Marchantiophyta*) und die Laubmoose (*Bryophyta*). Der Lebenszyklus umfasst zwei Generationen, den haploiden Gametophyten – die eigentliche, grüne Moospflanze – und den diploiden Sporophyten. Bei den Moosen erreicht demnach die haploide Phase die größte Differenzierung im gesamten Pflanzenreich. Als Relikt ihrer Abstammung sind sie in ihrer Fortpflanzung an Wasser gebunden. Die Gruppe der Moose ist in Österreich mit ca. 1 070 Arten in allen Ökosystemen und Höhenstufen vertreten (Köckinger et al., 2012a).

Klimawandelrelevante funktionale Rolle im ökosystemaren Kontext

Moose zeigen aufgrund ihrer wechselfeuchten Lebensweise eine Vielzahl an physiologischen Eigenschaften die einzigartig im Pflanzenreich sind. Diese Spezialisierungen machen sie aber auch höchst anfällig gegenüber Veränderungen, z. B. im Luftchemismus, dem atmosphärischen Nährstoffeintrag oder dem Temperatur- und Feuchtigkeitsregime.

Moose sind in Bezug auf die Funktionalität und Zusammensetzung ein wichtiger Bestandteil vieler Ökosysteme. In manchen klimarelevanten Ökosystemen (z. B. Moore) nehmen sie eine dominierende Rolle ein und machen bis zu 90 % der Biomasse des Systems aus. Entsprechend groß ist ihre Stellung als CO_2 Speicher. Weitere Beispiele für ihre Bedeutung sind die Regulierung der Luftfeuchtigkeit in bodennahen Bereichen (Tuba, 2011), die Einflussnahme auf das Keimverhalten vieler Pflanzen (Bates, 2009) oder ihre Rolle als Pionierpflanzen und Bodenbildner in frühen Sukzessionsstadien. Moose regulieren über ihre Fähigkeit atmosphärisch deponierte Partikel (z. B. Nährstoffe) aufzunehmen den Mineralstoffhaushalt vieler Ökosysteme (Vanderpoorten und Geoffinet, 2009).

Sensitivität in Bezug auf Klimavariable

Klimawandel beeinflusst Moose auf direktem und indirektem Weg: Direkt, weil Moose nur einen geringen Toleranzbereich in Bezug auf ausgewählte Umweltfaktoren haben. Dies betrifft in Österreich vor allem Moose niedriger Lagen. Wie Grafschafter (2007) in Wachstumsversuchen gezeigt hat, ist die Absterbensrate selbst von wärmeadaptierten Arten des pannonischen Raumes bei erhöhten Temperaturen groß.

Eine deutlich größere Beeinflussung geht von indirekten Folgen aus. Die meisten Moose haben ein deutlich geringeres Temperaturoptimum (um ca. 15 °C) als die Gefäßpflanzen. Das Optimum von Hochgebirgsarten liegt um 5 °C, manche Spezialisten vermögen sogar unter 0 °C positive Assimilationsleistungen zu erbringen (z. B. unter einer Schneedecke). Moose haben aufgrund dieser Eigenschaften in Extremlebensräumen wie im Hochgebirge, in Mooren oder Trockenrasen einen großen Anteil an der Biomasse (Bates et al., 1998). Moose sind in Bezug auf ihren CO_2 Haushalt C3-Pflanzen, können aber nur bedingt das erhöhte CO_2-Angebot in bodennahen Schichten nutzen (Sveinbjörnsson und Oechel, 1992). Temperatursteigerungen führen zu Wachstumseinbußen bei an Kälte angepassten Arten (Tuba et al., 2011, Jägerbrand et al., 2011). Gleichermaßen begünstigen atmosphärische Stickstoffeinträge viele Gefäßpflanzen (z. B. Gräser). Die meisten Moose, welche den zusätzlichen Dünge-Eintrag nicht nutzen können, werden durch Konkurrenz allmählich aus ihren Nischen verdrängt (Jägerbrand et al., 2011). Auch innerhalb der Moose gibt es Unterschiede in der Verwertung des zusätzlichen N-Angebots und somit Gewinner, bzw. Verlierer. Konkurrenz durch Gefäßpflanzen ist in (hoch)alpinen Systemen ein das Vorkommen von Moosen bestimmender Ökosystemprozess. Das veränderte Regime der Schneeschmelze und einer dadurch bedingten längeren Vegetationsperiode für Gefäßpflanzen bewirken zusätzlichen Konkurrenzdruck.

Klimawandelfolgen in Österreich

Die indirekte Beeinflussung der Diversität von Moosen durch Stickstoffdepositionen, welche aufgrund veränderter Niederschlagsregime in weiten Teilen Österreichs zu erwarten sind (siehe Band 2, Kapitel 4) ist in anthropogenen (Wiesen), als auch natürlichen Ökosystemen (Moore, Trockenrasen) bereits seit Jahren zu beobachten und punktuell untersucht (z. B. Zechmeister et al., 2003, 2007a; Koranda et al., 2007). In diesen Studien wurde ein deutlicher Rückgang der Moosarten mit steigender Stickstoffdeposition nachgewiesen. Zechmeister et al. (2007a) zeigten am Beispiel epiphytischer Moose auf der Integrated Monitoring-Fläche Zöbelboden jedoch auch unterschiedliche Konkurrenzverhältnisse innerhalb der Gruppe der Moose. Sie wiesen in dieser Langzeitstudie die Verdrängung seltener, stenöker Arten (z. B. *Zygodon dentatus*) durch starkwüchsige Moose (z. B. *Hypnum cupressiforme* var. *cupressiforme*) aufgrund hoher atmosphärischer Stickstoff-Einträge nach.

Konkurrenz durch Gefäßpflanzen aufgrund steigender Temperatur und veränderter Schneedeckendynamik mit kürzeren Schneedeckenperioden in alpinen und nivalen Lagen betrifft besonders Moose der Schneetälchengesellschaften. Untersuchungen hierfür gibt es von Hohenwallner et al. (2011) vom Schrankogel in Tirol, welche den Zusammenhang zwischen Schneedeckendauer und Zusammensetzung der Schneetälchenmoose zeigten und auf das Verschwinden einzelner Arten (z. B. *Anthelia julacea*) hinwiesen.

Auch das Verschwinden von *Tayloria rudolphiana* oder *Brotherella lorentziana* aus Niederösterreich, als auch das Höhersteigen der Arten *Saelania glaucescens* oder *Zygodon gracilis* (Kalk-Jochzahnmoos) könnte mit der Klimaerwärmung in Zusammenhang stehen (Zechmeister et al., 2013).Weiters sind in den letzten Jahren eine Reihe von Moosarten in Österreich gefunden worden, welche bislang primär aus dem mediterranen Raum bekannt waren (z. B. *Barbula consanguinea*, in: Köckinger et al., 2012b; *Ryhnchostegium megapolitanum*, in: Zechmeister et al., 2007b). Als Ursache für Einwanderung

und Ausbreitung kann in beiden Fällen aktuelle Klimaerwärmung angenommen werden. Zunehmende Erwärmung und steigende Niederschläge haben auch in Westösterreich bereits zu vermehrtem Auftreten von Arten geführt, welche bislang nur aus atlantischen Gebieten bekannt waren (z. B. *Calypogeia arguta*, in: Schröck et al., 2013).

In Österreich gibt es bislang nur punktuelle Untersuchungen zum Thema Klimawandel und Moose. Die dabei gegebenen Befunde und eine Vielzahl internationaler Studien lassen aber auf einen engen Zusammenhang zwischen Arealveränderungen und Dominanz von Moosen und dem Klimawandel schließen.

3.2.5 Blütenpflanzen und Farne

Allgemeine Charakterisierung

Die Artenzahl der Farn- und Blütenpflanzen (Gefäßpflanzen oder höhere Pflanzen) in Österreich ist mit 3 308 beständigen, wildwachsenden Arten und Unterarten (ohne Apomikten, d. h. Sippen ohne sexuelle Reproduktion; Niklfeld et al., 2008) im Vergleich zur Fläche des Landes sehr hoch und liegt über jener von Deutschland. In den collinen und montanen Landschaften Österreichs ist mit weit über tausend wild wachsenden Arten ein sehr heterogenes und vielfältiges Spektrum an funktionalen Typen anzutreffen. Dieses reicht von den zahlreichen Gräserartigen, die oft auf Feuchtstandorte spezialisiert sind, über Ephemere (kurzlebige) bis zu Klonpopulationen (genetisch idente, asexuell entstandene Nachkommen) ausbildenden Arten mit ewigem Leben. Innerhalb Österreichs liegen die artenreichsten Gebiete in den wärmebegünstigten Regionen (Englisch et al., 2005; Niklfeld et al., 2008). Der hohe Artenreichtum ist insbesondere auf die biogeographische Lage Österreichs am Kreuzungspunkt verschiedener Florengebiete, konkret der pannonischen, nordisch-borealen, atlantischen, submediterranen und mediterranen Floren zurückzuführen.

Mit zunehmender Seehöhe nimmt die Pflanzendiversität bis an die Kältegrenze des Pflanzenlebens ab (Moser et al., 2005). An und über der Waldgrenze bereichern neben arktisch-alpischen Elementen auch Endemiten und Subendemiten die Ausstattung Österreichs. Insgesamt sind es 103 endemische Arten und Unterarten, deren Verbreitungsareal ausschließlich oder überwiegend auf Österreich beschränkt ist (Essl et al., 2009), wobei eine deutliche Konzentrierung in den östlichsten Teilen der Alpen, die während der letzten Eiszeit nicht vergletschert waren, zu verzeichnen ist.

Zu den wichtigsten Arten, die auch wesentlich die ökosystemaren Serviceleistungen bestimmen, gehören zweifellos die Bäume, wobei der Großteil der Baumarten von Natur aus selten ist. Waldbildende Baumarten werden in Abschnitt 3.2.6 behandelt. Sträucher, die natürliche Gebüsche bilden sind vor allem an Randflächen des Waldes oder in Auen anzutreffen. Hier reicht das Spektrum von der Stechpalme (*Ilex aquifolium*) im regenreichen Westen bis zur Zwergmandel (*Prunus tenella*) im pannonischen Osten und zu Zwergsträuchern, die vor allem subalpin-alpin große Flächen einnehmen können.

Eine fundierte Darstellung der Lebensumstände unter Klimawandelbedingungen und die möglichen Reaktionen für die Gesamtheit der in Österreich vorkommenden Gefäßpflanzenarten erscheint gegenwärtig unmöglich. Im Folgenden werden anhand einiger besser bekannter Beispiele Reaktionsmuster in Bezug auf Klimafaktoren dargestellt. Forstlich relevante Baumarten und landwirtschaftlich genutzte Kulturpflanzen, über die bessere Kenntnisse vorliegen, werden in eigenen Unterkapiteln behandelt.

Klimawandelrelevante funktionale Rolle im ökosystemaren Kontext

Farn- und Blütenpflanzen dominieren die Vegetation der meisten natürlichen bis semi-natürlichen terrestrischen Ökosysteme und besiedeln alle Höhenstufen Österreichs vom planar-kollinen Tiefland bis zur Nivalstufe an der oberen Verbreitungsgrenze pflanzlichen Lebens.

Die meisten Gefäßpflanzen sind regional an relativ eindeutige Höhenintervalle gebunden (vgl. Fischer et al., 2008), die im Allgemeinen enger begrenzt sind als etwa bei Moosen und Flechten (Glime, 2007; Vittoz et al., 2010). Vereinzelt können höhere Pflanzen aber auch in lokalen Rückzugsgebieten weitab vom Hauptvorkommen existieren. Beispiele sind die Eislöcher und Kondenswassermoore und schattige Felsen in tiefen Schluchten. Diese Habitate werden auch bei Projektionen zu den Folgen des Klimawandels oftmals zu wenig beachtet. Begrenzte Migrationsrationsraten und schlechte Besiedelbarkeit von potentiell neuen Habitaten können die autonome Anpassung von Pflanzenarten an ein sich veränderndes Klima stark beeinflussen bzw. die Bildung potentieller Fluchtnischen behindern, bzw. sogar verhindern.

In Bezug auf den zentralen pflanzenökologischen Prozess der Photosynthese werden C3-und C4- Pflanzen unterschieden. C4-Pflanzen haben Vorteile im Vergleich mit dem C3-Typ, da sich bei heißem und trockenem Wetter ihre Spaltöffnungen schließen, um einer zu hohen Verdunstung von Wasser vorzubeugen. Daher weisen sie unter diesen Bedingungen eine verringerte Photosyntheseleistung auf. Sie sind jedoch unter

normalen Temperatur- und Lichtverhältnissen effizienter. Die meisten Pflanzen in den mittleren und hohen Breiten gehören zu den C3-Pflanzen.

Das jeweilige Verhalten von Pflanzen in Bezug auf Klimaparameter bzw. das Zusammenwirken mit anderen Arten über Ökosystemprozesse wie Konkurrenz und positive Interaktionen (Mutualismus und Kommensalismus) bestimmen wesentlich die Auswirkungen, die ein sich veränderndes Klima auf Zusammensetzung, Struktur und Funktionsweise von Ökosystemen hat.

Sensitivität in Bezug auf Klimavariable

Sowohl die Photosynthese als auch die Atmung sind von der Temperatur abhängig. Während die Photosynthese bei C3-Pflanzen bereits bei ca. 15–30 °C ihr Maximum erreicht, steigt die Kurve der Atmung weiter exponentiell bis zu einer Temperatur von ca. 45 °C an. Somit sinken oberhalb einer Optimaltemperatur von etwa 15–25 °C die Netto-Assimilation und damit die Biomassebildung der Pflanzen wieder ab. Für die an mitteleuropäische Bedingungen angepassten Nutzpflanzen liegt bei unbedecktem Himmel das Temperaturoptimum bei ca. 20 °C. Bei C4-Pflanzen liegt das Temperaturoptimum der Photosynthese höher, sodass auch das Optimum der Netto-Assimilation in einem höheren Temperaturbereich liegt. Die durch höhere Temperaturen (bei gleichzeitig anderen begünstigenden Faktoren) bedingte höhere Assimilationsleistung führt bei manchen Pflanzen auch zu den gewünschten höheren Zuckerkonzentrationen, wie z. B. bei der Zuckerrübe. Mais ist eine wärmeliebende und relativ hitzeresistente C4-Pflanze. Allerdings kann starker Trockenstress, kombiniert mit sehr hohen Temperaturen, während der Blühphase zu schlechterer Befruchtung und damit zu Ertragsausfällen führen (Eitzinger et al., 2009c). Nutzpflanzen unterscheiden sich auch in ihrer Frostresistenz oder den Keimtemperaturen sowie in ihrer Hitzeresistenz deutlich (z. B. Larcher, 1994).

Neben der regulativen Funktion des Wärmehaushaltes spielt die Wasserversorgung bei den biochemischen Prozessen in der Pflanze eine wichtige Rolle. Daher ist die Verfügbarkeit von Wasser einer der am häufigsten limitierenden Faktoren für das Pflanzenwachstum. Die Verfügbarkeit von Wasser bestimmt auch den Gasaustausch zwischen Atmosphäre und Blättern, da bei nicht ausreichender Wasserversorgung die Spaltöffnungen der Blätter geschlossen werden und somit auch der CO_2-Fluss für die Photosynthese in das Blattinnere behindert wird. Die Biomassebildung ist daher eng mit dem Wasserverbrauch (oder der Transpiration) der Pflanze gekoppelt (Eitzinger et al., 2009c).

Wo Lichtmangel ein limitierender Faktor ist und die Temperaturen niedrig sind (in gemäßigten Klimazonen), sind C3-Pflanzen im Vorteil. C4-Pflanzen sind dagegen im offenen Gelände wärmerer Klimazonen erfolgreicher.

Keine der Blütenpflanzen- und Farnarten Österreichs wächst isoliert sondern bildet mit anderen Arten Pflanzengesellschaften, deren Zusammensetzung aus den jeweiligen Standortfaktoren und den Interaktionen mit anderen Arten sowie der Tierwelt resultiert. Diese Pflanzengesellschaften sind nicht zufällig zusammengesetzt sondern bilden Typen, die für Österreich im Wesentlichen bekannt sind (Mucina et al., 1993). So sehr die Artengarnituren für bestimmte Pflanzengesellschaften konstant sein können, sind auch hier deterministische Prognosen bezogen auf einzelne Pflanzengesellschaften schwierig oder unmöglich, weil einzelne Arten auf klimatische Veränderung unterschiedlich reagieren. Ruderal- und Unkrautfluren, zum Beispiel, verändern sich rasch. Aber auch in den sehr persistenten Pflanzengesellschaften der hochalpinen Rasen wurden Veränderungen nachgewiesen (Gottfried et al., 2012).

Noch komplexer wird die Situation, wenn die Tierwelt und die Destruenten im Sinne des Ökosystemkonzepts einbezogen werden. Nahrungsnetze reagieren und verändern sich. Besonders diskutiert wird im Zusammenhang mit dem Klimawandel der sogenannte „mismatch“ zwischen Bestäubergilden (Gilden sind Arten, die vergleichbare Ressourcen nutzen) und den beobachteten Klimaänderungen. Arten beginnen früher zu blühen, zu einem Zeitpunkt, da die Bestäuber ihren Reproduktionszyklus noch nicht vollständig abgeschlossen haben. Beobachtungen dazu legen dies nahe, allerdings nicht in einem dramatischen Ausmaß.

Die alpin verbreitete Gämsheide (*Loiseleuria procumbens*) besiedelt extrem windgefegte, im Winter schneefreie Windkanten. Sowohl extremer Frost (Frosttoleranz bis unter −40 °C) als auch Wasserentzug im Winter durch Frosttrocknis werden von der Gämsheide ertragen (Grabherr, 1977, 1979), bzw. führen nur zu einem partiellen Absterben von Pflanzenteilen. Der ökologische Gegenentwurf zur Gämsheide ist die Rostrote Alpenrose (Rhododendron ferrugineum), die an Standorten mit längerer Schneebedeckung vorkommt (Larcher und Wagner, 2004; siehe Box 3.2). Hochgebirgspflanzenarten, die an extrem kalte Lebensräume angepasst sind, können in wärmerer Umgebung durch Stoffwechsellimitierung beeinträchtigt werden. Die generell sehr hohe Atmungsintensität, etwa beim Gletscherhahnenfuß (*Ranunculus glacialis*) kann bei Temperaturzunahme die Kohlenstoffbilanz der Pflanze negativ beeinflussen (Cooper, 2004).

Eine ganz wesentliche Anpassung der höheren Pflanzenarten an Klimavariabilität ist im modularen Aufbau zu suchen.

Box 3.2: Beispiel Alpenrose
Box 3.2: Case study *Rhododendron ferrugineum*

Die Rostblättrige Alpenrose (*Rhododendron ferrugineum*) ist die vielleicht am besten untersuchte Pflanzenart in Österreich (Larcher und Wagner, 2004). Sie ist in den Alpen im Bereich des Waldgrenzökotons weit verbreitet und bildet auf kalkfreien Substraten dichte Bestände mit einer verhältnismäßig geringen Zahl assoziierter Arten, vor allem Ericaceen-Zwergsträuchern, wie Heidelbeere, Rauschbeere, Zwergwacholder und Moosmatten im Unterwuchs auf sauren Rankern oder Podsolböden (Grabherr und Mucina, 1993). Die Aufschließung der Bodennährstoffe wird durch typische Ericaceen-Mykorrhiza angeregt.

Messungen an Standorten der Alpenrose ergaben ein Jahresmittel der Lufttemperatur von 0,2 bis 2,0 °C, die absoluten Minima betrugen −28 bis −29 °C. Gemäß Ergebnissen von Untersuchungen zur Frosttoleranz wären diese Temperaturen für die Alpenrose letal. Allerdings treten Frostschäden nur in Ausnahmefällen auf, wenn die meist vorhandene Schneedecke gestört wird oder der Winter extrem schneearm ist. Dies deutet darauf hin, dass vor allem starke Veränderungen im Niederschlagsregime (vor allem Zunahme der zwischenjährlichen Variabilität) negative Auswirkungen auf Alpenrosenpopulationen haben würden.

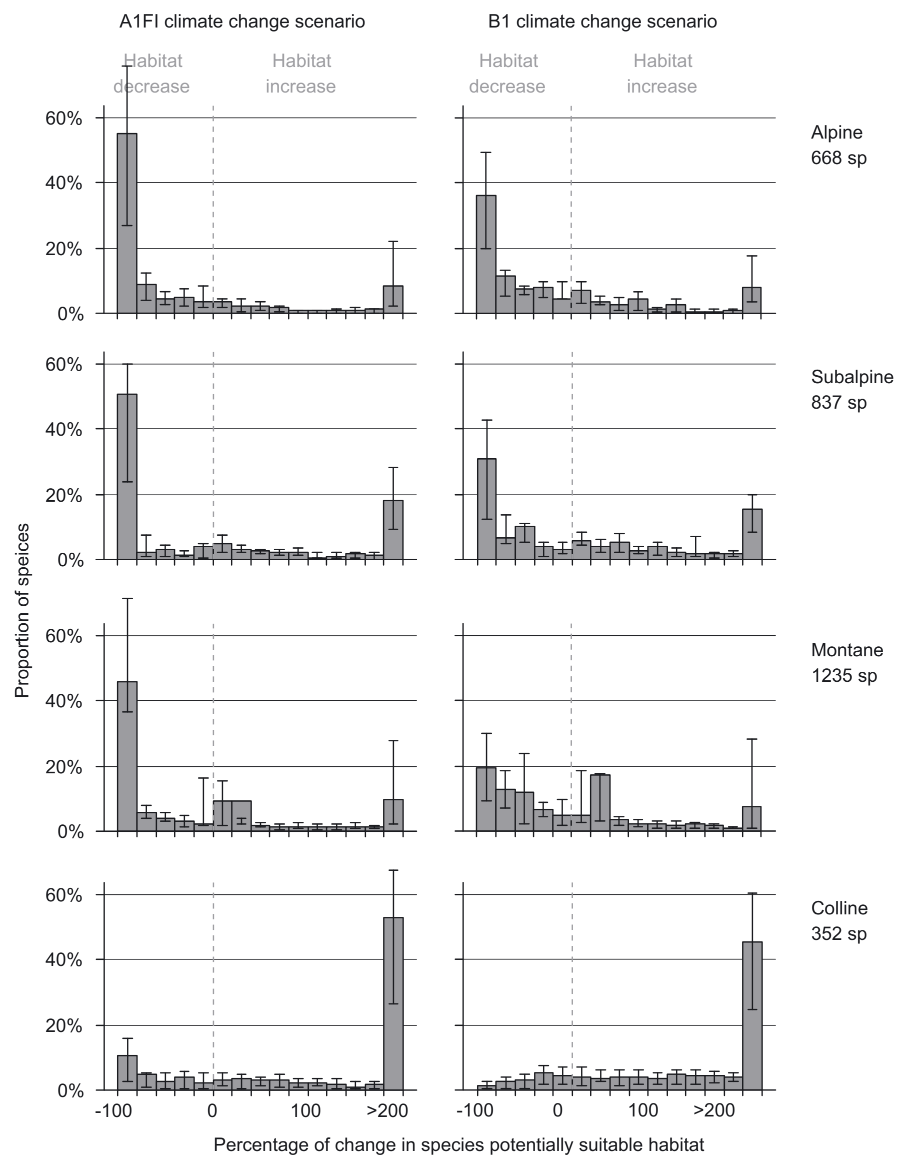
Die Bodentemperaturen in Alpenrosenbiotopen können 10 °C übersteigen und bestimmen die Atmungsverluste in den Wurzeln. Die relative Zunahme der Atmungsintensität bei Temperaturzunahme dürfte wie bei vielen Alpinpflanzen hoch liegen. Inwiefern wärmere Böden dadurch die Kohlenstoffbilanz der Alpenrose negativ beeinflussen, wie etwa beim Gletscherhahnenfuß (Cooper, 2004), ist noch ungeklärt. Sehr kalte Böden können hingegen das Wachstum verhindern, nachdem das Streckungswachstum der Zellen erst bei ca. +5 °C anspringt. Besonders wirksam ist mit Sicherheit Bodenfrost, der als Kammeis in Erscheinung treten kann. Durch die Ausdehnung des Eises übt Bodeneis vor allem eine mechanische Wirkung aus und führt zur Bodenauflockerung und folgender Winderosion.

In den dichten Beständen kommt es an Schönwettertagen im Sommer zu einer Erwärmung des Mikroklimas von im Durchschnitt 5–10 °C, nicht selten auch mehr (bis 35–38 °C, im Extrem sogar über 40 °C). Hitzeschäden sind nicht ausgeschlossen, eine gefährliche Schädigung ganzer Bestände ist allerdings kaum denkbar. Sommerschnee und Sommerfrost kann jedoch im Extremfall zur Vernichtung eines Großteils der Blüten und Jungtriebe führen.

Kombinierte Klimaeffekte sind vor allem in Zusammenhang mit dem Wasserhaushalt bedeutend. Die Laurophyllie der Alpenrosenblätter (laurophylle Blätter sind an warmes aber feuchteres Klima angepasst; besonderer Schutz vor Kälte oder Austrocknung ist nicht ausgebildet) ist gekoppelt mit einer sehr sensiblen Regulation der Spaltöffnungen (Stomata) und einem sehr effizienten kutikulären Widerstand. Zumindest in den österreichischen Bergen dürfte die Alpenrose nicht gefährdet sein. Im Winter sind die Stomata durchwegs geschlossen, die Reaktivierung erfolgt bei Exemplaren unter Schnee sehr rasch, bei exponierten Individuen dauert es länger (2 bis 3 Tage). Der Verlust an Wasser durch die Kutikula kann allerdings so groß werden, dass es zu Trockenschädigungen kommen kann. Wasserstress durch Frosttrocknis bis an die Letalgrenze kann im Spätwinter häufig auftreten. Schadpilze wie *Chrysomyxa rhododendri*, der Fichtenrost, dem die Alpenrose als Zwischenwirt dient, können auftreten.

Neben Eigenschaften wie Kohlenstoffautotrophie (d. h. auf anorganische Kohlenstoffverbindungen [CO_2] als Kohlenstoffquelle angewiesen) und der Fähigkeit der Wasser- und Mineralstoffversorgung durch das Wurzelsystem ist es die Regenerationsfähigkeit der Sprosspflanzen welche eine grundsätzlich sessile Lebensweise erlaubt, da Schäden durch Bildung neuer Triebe ausgeglichen werden können. Schäden durch Wetterextreme, Schadinsekten, Pilzparasiten und Herbivore sind im Zusammenhang mit der Erforschung von Klimafolgen für einzelne Arten ebenso zu berücksichtigen wie stetige, gerichtete Veränderungen der Durchschnittstemperatur. Letztendlich ist aufgrund der vielen Einflussfaktoren eine kausal verankerte Prognose über die Reaktionsweise von Pflanzenpopulationen nur für eine geringe Anzahl von Arten möglich.

Ein Phänomen, das korrelative Zusammenhänge zwischen Auftreten von Pflanzenarten und Klimafaktoren kausal schwierig erklärbar macht, ist die Langlebigkeit von einzelnen Pflanzenarten, die dafür sorgt, dass Pflanzenarten auch unter einem „neuen", wärmeren Klima beharrlich ihren Platz behaupten – sie sozusagen in „falschen" bzw. ungeeigneten



21st century climate change threatens mountain flora unequally across Europe, Engler et al., Global Change Biology, Volume 17/ 7; © 2011 Blackwell Publishing Ltd.

Abbildung 3.2 Mit Nischenmodellen prognostizierte Habitat-Verluste von Gefäßpflanzen in europäischen Gebirgsökosystemen, inklusive der österreichischen Alpen, in den verschiedenen Höhenstufen. Die y-Achsen repräsentieren die Prozentsätze von allen pro Höhenstufe modellierten Arten, die x-Achsen den Anteil des aktuell für diese Arten geeigneten Areals, den sie bis zum Jahr 2080 verlieren oder gewinnen würden. Die modellierten Habitat-Verluste bzw. -Zugewinne sind für zwei verschiedene Klimawandelszenarien dargestellt. Beispiel: für ca. 55 % der modellierten 668 alpinen Arten würde unter dem A1FI Szenario (Bezugszeitpunkt 2100) das geeignete Areal um mehr als 80 % schrumpfen. Quelle: Engler et al. (2011)

Figure 3.2 Projected habitat losses of vascular plants in European mountain systems, including the Austrian Alps, in each elevation belt. The y-axes represent percentages of all modelled species per elevation belt, x-axes the proportion of losses or of gains of suitable habitats by 2080, relative to a species' current distribution. Projected habitat losses or gains are shown for two different climate change scenarios. Example: About 55% of the modelled 668 alpine species would lose more than 80% of the suitable area under the A1FI scenario (time reference 2100). Source: Engler et al. (2011)

Habitaten überdauern können. Die große Bedeutung klonaler Populationen, die hunderte, ja tausende Jahre überdauern können, zeigt sich vor allem bei Zwergsträuchern, bei alpinen Rasenbildnern, aber auch Wasserpflanzen wie Schilf. De Witte et al. (2012) gelang vor kurzem mittels DNA-Fingerprinting die Bestätigung, dass die klonalen Systeme der Grasart *Carex curvula* ein Alter bis zu 5000 Jahre erreichen können. Bei den ältesten Klonsystemen fand das Keimereignis zu Zeiten des Ötztaler Eismanns, d.h. in einer klimagünstigen Phase statt.

In den tieferen Lagen könnten invasive gebietsfremde, häufig sehr anpassungsfähige und oft wärmeliebende Pflanzenarten, die durch den Menschen aus anderen Kontinenten eingeführt wurden, durch eine Klimaerwärmung gefördert werden (Rabitsch et al., 2013; IPCC, 2014). Am Südrand der Alpen konnte sich während des späten 20. Jahrhunderts etwa die Chinesische Hanfpalme (*Trachycarpus fortunei*) in Laubwäldern im Tessin etablieren (Walther et al., 2005).

Klimawandelfolgen in Österreich

Der Stand des Wissens zu Waldbaumarten und agrarisch genutzten Pflanzenarten wird in den Abschnitten 3.2.6, 3.2.7 und 3.2.8 dargestellt. Hier werden exemplarisch Klimawandelfolgen für andere Gefäßpflanzen beschrieben.

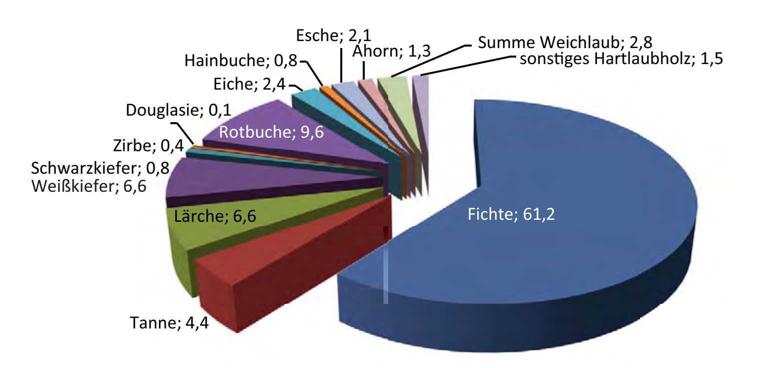


Abbildung 3.3 Relative Anteile der Baumarten an der Österreichischen Waldfläche (Ertragswald). Quelle: Österreichische Waldinventur (Anonymus, 2009)

Figure 3.3 Relative shares of tree species in Austrian production forests according to the Austrian Forst Inventory (Anonymus, 2009)

Die ohnehin kleinflächigen Vorkommen von Gebirgspflanzen könnten durch indirekte Erwärmungseffekte, etwa infolge von Konkurrenz durch nachrückende, rascher- und höherwüchsige Arten oder direkt durch physiologischen Stress, weiter eingeengt werden. Nischen-basierte Modelle prognostizieren das regionale Aussterben vieler alpiner und nivaler Arten oder zumindest starke Arealverluste und zunehmende Fragmentierung der überlebenden Populationen (z. B. Dirnböck et al., 2003; Engler et al., 2011; Abbildung 3.2). Gegen solche Prognosen wurden allerdings Vorbehalte geäußert: zum einen könnte die ausgeprägte Reliefenergie von Hochgebirgslandschaften das Überdauern der Arten in klimatischen Mikro-Nischen erlauben (Randin et al., 2009; Scherrer und Körner, 2010). Zum andern berücksichtigen die verwendeten Modelle keine transienten Migrationsbewegungen, sondern projizieren einen potentiellen Endzustand der Verteilung geeigneter Habitate unter einem hypothetischen neuen, stabilen Klimaregime.

Erste Simulationen mit Hybridmodellen legen nahe, dass die Arealdynamik von Hochgebirgspflanzen mit starker Verzögerung auf klimatische Trends reagieren wird und die von Nischenmodellen prognostizierten Arten- und Arealverluste daher eventuell mit einer Verspätung von Jahrzehnten eintreten werden (Dullinger et al., 2012). Diese Verzögerung resultiert aus der Fähigkeit der großteils langlebigen und klonalen Arten, ungünstige klimatische Bedingungen über längere Zeiträume als sogenannte „remnant populations" zu überdauern. Längerfristig wird durch den Abtrag der entstehenden „Aussterbeschuld" (Jackson und Saxon, 2010) die Biodiversitätsbilanz der höheren Lagen aber vermutlich deutlich weniger positiv ausfallen.

3.2.6 Waldbaumarten

Abgrenzung und Charakterisierung

Die im österreichischen Wald anteilsmäßig dominierenden Baumarten (ÖWI, 2007/09) sind bei den Nadelbäumen Fichte (*Picea abies*), Weisskiefer (*Pinus sylvestris*) und Lärche (*Larix decidua*), bei den Laubbäumen die Buche (*Fagus sylvatica*), Stieleiche (*Quercus robur*), Esche (*Fraxinus excelsior*) und Bergahorn (*Acer psedoplatanus*). Die Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*) ist mit weniger als 0,2 % Flächenanteil die häufigste nicht heimische Baumart (Abbildung 3.3). Natürlich dominierende Baumarten sind unter historisch-aktuellem Klima in der kollinen Höhenstufe die Eiche; submontan die Buche; in den montanen Höhenstufen je nach Bodentyp und Ausgangssubstrat die Buche, die Fichte und die Tanne; in den hochmontanen und subalpinen Höhenstufen die Fichte, die Lärche und fallweise die Zirbe. Durch intensive Bewirtschaftung ist der Anteil der Fichte erhöht und ihr Vorkommensbereich auf tiefgelegene Laubmischwaldstandorte ausgedehnt worden.

Baumarten sind potentiell besonders anfällig für Klimawandelfolgen. Ein Hauptgrund dafür ist der lange Generationszyklus von Bäumen, der in mitteleuropäischen Waldökosystemen mindestens mehrere Jahrzehnte, in der Regel jedoch noch deutlich längere Zeiträume umfasst. Dies ermöglicht nur relativ langfristig eine Anpassung an den aus der Sicht der Waldbäume sehr rasch fortschreitenden Klimawandel, die als genetische Anpassung oder in Bezug auf die Artenzusammensetzung erfolgen kann. Andererseits ist daraus auch ersichtlich, dass Baumarten aufgrund ihrer Langlebigkeit imstande sein müssen, die beträchtliche interannuelle Variabilität des Klimas zu tolerieren. Ist das Ausmaß der klimatischen Veränderung an einem Waldstandort allerdings größer als es die dort wachsenden Baumarten tolerieren können, führt dies zu einer physiologischen Schwächung und letztlich zum Absterben der betroffenen Baumindividuen entweder direkt durch klima-

bedingte Faktoren wie z. B. Trockenheit, durch Krankheiten und Insekten (siehe Abschnitt 3.2.10) oder indirekt über die Verdrängung durch unter einem veränderten Klima konkurrenzkräftigere Baumarten.

Sensitivität in Bezug auf Klimavariable

Im Fall von einjährigen Intensivkulturen in der Landwirtschaft vermag die Kenntnis des Einflusses von Klimafaktoren auf produktionsökologische Prozesse (Photosynthese, Respiration) bereits ein relativ gutes Bild von den möglichen Auswirkungen einer Klimaänderung zu vermitteln. Im Gegensatz zu weitgehend künstlichen Agrarsystemen handelt es sich im Fall von Waldökosystemen in weiten Bereichen Zentral- und Mitteleuropas um relativ naturnahe, oftmals aus mehreren Baumarten bestehende, Mischwälder. Da Baumarten individuell auf Veränderungen in ihrer Umwelt reagieren und klimasensitive Prozesse wie Störungen zusätzlich auch die Dynamik auf ökosystemarer Ebene verändern, sind Auswirkungen einer Klimaveränderung auf die Entwicklungsdynamik in Wäldern bedeutend schwieriger abzuschätzen. Die Kenntnis, wie sich eine Klimaveränderung auf Prozesse der Nettoprimärproduktion und des Pflanzenwachstums auswirkt, reicht im Fall von Wäldern nicht aus. Zum Verständnis von naturnah bewirtschafteten Waldökosystemen sind darüber hinaus auch die populationsdynamischen Prozesse der Reproduktion und Verjüngung sowie der Baummortalität notwendig.

In Tabelle 3.4 sind Klimafaktoren und eine Auswahl von ihnen ausgehender Wirkungsmechanismen in Bezug auf Wachstum, Reproduktion und Mortalität von Waldbäumen dargestellt.

Baumwachstum

Ein Temperaturanstieg führt zu positiven Wachstumseffekten; bei gleichbleibenden oder abnehmenden Niederschlägen steigt aber auch die Evapotranspiration (Rebetez und Dobbertin, 2004). Pflanzen reagieren auf Trockenstress mit dem Schließen der Stomata um Wasserverlust und Blattwelke zu verringern (Larcher, 2003). Während die Verringerung der Stomata-Leitfähigkeit eine Anpassung an Trockenstress ist, reduziert das Schließen der Stomata die Photosynthese und die C-Aufnahme (Körner und Ohsawa, 2006). Durch die höhere Evapotranspiration bei wärmeren Temperaturen kann es in Gebieten mit geringeren Niederschlägen insbesondere im Sommerhalbjahr dazu führen, dass der Verdunstungsbedarf das Niederschlagsangebot übersteigt und, abhängig von der Wasserspeicherkapazität des Bodens, dies relativ rasch zu Trockenstress führt. Diese Situation wird durch geringere Schneehöhen und kürzere Schneedeckendauer im Frühjahr noch verschärft.

Die größere Wassernutzungseffizienz bei erhöhtem CO_2-Gehalt der Atmosphäre vermag teilweise die schlechtere Wasserversorgung auszugleichen. Steigen jedoch gleichzeitig die Temperaturen, könnte dieser Effekt wieder durch den erhöhten Kühlungsbedarf der Blattorgane durch Transpiration verloren gehen. Der direkte CO_2-Düngungseffekt durch höheren Partialdruck von CO_2 im Blattinneren reduziert durch die Beeinflussung des Enzymsystems die Photorespiration und erhöht dadurch die Brutto-Photosynthese. Es ist jedoch noch immer unsicher, inwieweit die in Experimenten festgestellte Steigerung der Assimilationsleistung durch CO_2-Düngung von kurzfristig bis zu 60 % (z. B. Norby et al., 1999), bezogen auf einen CO_2-Gehalt der Atmosphäre von 580 ppm, langfristig aufrecht erhalten werden kann (siehe dazu auch Körner und Ohsawa, 2003; Ainsworth und Long, 2005). Ein Grund für diese mögliche „Akklimatisierung“ von Wäldern könnten andere limitierende Faktoren sein (z. B. Nährstoffe). Außerdem wurde festgestellt, dass die Dichte der Spaltöffnungen an den Blattorganen seit etwa 200 Jahren kontinuierlich abgenommen hat. Dies könnte ebenfalls auf einen nicht nachhaltigen Effekt der CO_2-Düngung hindeuten.

In Gebirgslagen ist allgemein von einem positiven Effekt einer Erwärmung auf die Biomasseproduktivität auszugehen. In inneralpinen Tälern und Becken könnten die positiven Auswirkungen von längeren Vegetationsperioden und günstigeren Temperaturverhältnissen (das Temperaturoptimum für die Brutto-Photosynthese liegt abhängig von der Baumart meist unter 30 °C und wird damit an vielen Tagen während der Vegetationsperiode nicht erreicht) durch eingeschränkte Wasserversorgung aufgehoben werden. Während jedoch die Brutto-Photosynthese bei Temperaturen über dem Optimum wieder abnimmt, steigt die Atmung mit der Temperatur steil an (Larcher, 2003). Zusätzlich zur möglichen Beeinträchtigung des Enzymsystems wirken sich Hitzeperioden mit Temperaturen über 30 °C generell negativ auf die Nettophotosynthese aus. Satellitengestützte und wachstumskundliche Untersuchungen in den Alpen zeigen z. B. für den europäischen Hitzesommer 2003, dass Hochlagen von diesen extremen Bedingungen profitieren konnten, während für weite Teile der Mittel- und Tieflagen deutliche Wachstumsrückgänge dokumentiert sind (Jolly et al., 2005).

Die tatsächliche Verlängerung der Vegetationsperioden wird durch phänologische Beobachtungen gestützt. Anhand der Periode 1971 bis 2000 konnten Menzel et al. (2006) ein früheres Austreiben bei Baumarten und teilweise eine spätere

Tabelle 3.4 Sensitivität von Waldbaumarten in Bezug auf klimabedingte Umweltfaktoren. B = Beobachtung, E = Experiment, S = Simulation
Table 3.4 Sensitivity of forest tree species with regard to climate-related environmental factors. B = observation, E = experiment, S = simulation

Klimafaktor	Wirkungsmechanismus	B/E/S	Baumarten
höhere Temperatur	Besseres Wachstum durch höhere Netto-Photosynthese, da Temperatur-Optima (ca. 28–30 °C) für viele Baumarten unter heutigem Klima noch nicht erreicht sind	B, E, S	Alle heimischen Waldbaum-arten
	Steigende C-Verluste durch Atmung – Atmungsrate steigt exponentiell mit der Temperatur an	B, E, S	
	Verringertes Wachstum durch direkte Hitzeschäden	E, B	
	Verringertes Wachstum durch Trockenstress wegen ungünstigerer Wasserbilanz durch erhöhten Verdunstungsbedarf (insbesondere in Sommermonaten)	E, B, S	Buche
	Direkte Hitzeschäden an Keimlingen	E, B	
	Höheres Mortalitätsrisiko durch poikilotherme Schädlinge (siehe Abschnitt 3.2.4)	B, S	Fichte, Kiefer, Tanne
	Höhere Prädisposition gegenüber Winterstürmen durch geringere Bodenfrostdauer und -intensität	B, S	v. a. Koniferenarten, besonders betroffen flachwurzelnde Arten wie Fichte
	Erhöhte Waldbrandgefahr durch schnelleres Austrocknen von brennbarem Material im Wald	B, S	Alle Baumarten
Spätfrost	Absterben von frischen Trieben (Wechselwirkung mit längerer Vegetationsperiode)	E, B	Buche, Eichen
	Absterben von Jungpflanzen durch Frost	B, S	v. a. Spätfrost-gefährdete Arten, z. B. Buche
längere Vegetations-periode	Besseres Wachstum durch verlängerte Vegetationsperiode, wo Temperatur heute limitierender Faktor ist (z. B. Gebirge, nördliches Europa)	B, S	
	Änderungen in Austriebs- und Blühzeitpunkt (Phänologie) können zu einer abnehmenden Schädlingsgefährdung durch gestörte Synchronisierung von Austriebszeitpunkt und Schädlingsauftreten führen	B5	z. B. im Fall des Grauen Lärchenwicklers
eingeschränkte Wasserversorgung, Trockenperioden	Verringertes Wachstum durch Trockenstress; insbesondere bei Baumarten die sensitiv auf sommerliche Trockenperioden reagieren; Nadelbaumarten reagieren hydrostabil, die meisten Laubbaumarten hydrolabil (Wohlfahrt und Mayr, 2012; Karrer et al., 2012)	B, S, E	Buche, Fichte
	Verbesserte Habitatbedingungen (Brutmaterial) für einzelne Insektenarten durch physiologische Schwächung von Wirtsbäumen wegen Trockenstress	E, B	Fichte, Buche
	Verringerte Gefährdung durch Schneeschimmel in Gebirgswäldern wegen kürzerer Schneedeckendauer	B	Fichte, Zirbe
	Erhöhte Waldbrandgefahr durch geringere Feuchtegehalte von brennbarem Material im Wald	B, S	Alle Baumarten
	erhöhte Baummortalität durch Trockenheit	B, S	
	Baumartenwechsel in Folge von trockenheitsbedingten Mortalitätsevents	B, S	v. a. trockenheitsgefährdete Baumarten wie Fichte
	Verjüngungsprobleme als Folge von Absterben von Jungpflanzen durch Trockenheit	B, S	v. a. trockenheitsgefährdete Baumrten, z. B. Fichte
Höherer Niederschlag, verbesserte Wasserversorgung	Verbessertes Wachstum durch günstigere Wasserbilanz wenn heute wasserlimitiert	B, S	Alle Baumarten
	Höhere Infektionsgefahr durch Pilzsporen	E	
Erhöhter CO_2-Gehalt in der Atmosphäre	Verbessertes Wachstum durch CO_2-Düngungseffekt und bessere Wassernutzungseffizienz	E	
	Komplexe Interaktion zwischen Nahrungsqualität von Wirtsbäumen und Insektenentwicklung	E, B	
	Geändertes Verhältnis zwischen unter- und oberirdischer Biomasse durch Änderung der Allokation von Photosyntheseprodukten zu Pflanzenorganen	B, S	Alle Baumarten

Blattverfärbung im Herbst feststellen. Es stellt sich die Frage, ob generell mit der Komplexität der Klimawandeleinflüsse eine gegenseitige Verstärkung oder, wie von Leuzinger et al. (2011) postuliert, eine Überlagerung und eine gegenseitige Aufhebung von positiven und negativen Effekten wirksam werden.

Die in den Ergebnissen von nationalen Waldinventuren und Dauerversuchsflächen seit den 1980er Jahren festgestellten Zuwachssteigerungen (z. B. Spiecker (2000) für Dänemark, Deutschland, Österreich, Frankreich, Schweden und die Schweiz; Pretzsch und Utschig, 2000; Ciais et al., 2008) werden teilweise verbesserten Bewirtschaftungsmethoden, Stickstoffeinträgen in Waldökosystemen, verlängerten Vegetationsperioden und dem erhöhten CO_2-Gehalt der Atmosphäre zugeschrieben. Bäume können sich jedoch steigenden CO_2-Gehalten anpassen und dieser Effekt kann daher rasch aufgehoben werden (Bader et al., 2013).

Der derzeitige Stand des Wissens geht davon aus, dass auf einem Großteil der untersuchten Waldflächen dem Stickstoffeintrag die wichtigste Rolle bei der Erklärung der positiven Zuwachstrends zukommt. Analysen mit Physiologie-basierten Waldwachstumsmodellen zeigten, dass von den beobachteten Zuwachssteigerungen auf Versuchsflächen seit 1920 zwischen 2 und 4 % auf den Anstieg des CO_2-Gehalts in der Atmosphäre zurückzuführen sind (Kahle et al., 2008). Eine weitere Verdoppelung der CO_2-Konzentration und höhere Temperaturen gemeinsam könnten zu zukünftigen Steigerungen in der Biomasseproduktivität von 15–25 % führen, wenn andere Faktoren nicht limitierend wirken (Cannell et al., 1998; Kellomäki und Leinonen, 2005). Ebenfalls in einer simulationsgestützten Analyse wurden die wärmeren Temperaturen der letzten Dekaden für die Veränderungen der Zuwachstrends im österreichischen Wald als zumindest mitverantwortlich identifiziert (Hasenauer et al., 1999). Eine zwischenzeitliche Reduktion der Zuwächse um das Jahr 1991 wurde in dieser Studie der verringerten Strahlung nach dem Ausbruch des Vulkans Pinatubo zugeschrieben.

Reproduktion & Waldverjüngung

Während zu Wachstumsprozessen von Baumarten zahlreiche Forschungsergebnisse vorliegen, bestehen in Bezug auf die Sensitivität von Reproduktions- und Verjüngungsprozessen auf Klimafaktoren derzeit noch große Wissenslücken. In Aufforstungen zum Beispiel, die bisher meist im Frühjahr und Frühsommer durchgeführt werden, könnten durch häufigere Trockenperioden hohe Ausfälle auftreten. Empirische Studien, die Veränderungen in der Baumartenzusammensetzung analysieren, fokussieren in vielen Fällen auf die besser zu isolierenden Prozesse Wachstum und Mortalität. Verjüngungsprozesse hingegen weisen oftmals eine große kleinstandörtliche Variabilität auf, sodass in vielen Fällen der Einfluss von klimatischen Faktoren kaum statistisch signifikant nachgewiesen werden kann. Im Gegensatz dazu konnten Pröll et al. (2011) am Standort Zöbelboden in Oberösterreich signifikante Einflüsse von Stickstoffeintrag und -mineralisierung auf die Reproduktion von Buchen und Bergahorn feststellen, während Effekte auf Eschen nicht nachweisbar waren.

Störungen und Baummortalität

Ob die oben beschriebenen potentiellen Zuwachssteigerungen durch eine Klimaänderung in der praktischen Waldbewirtschaftung tatsächlich realisiert werden können, wird zu einem wesentlichen Teil von dem zahlreiche potentielle Schadfaktoren abhängen, welche Störungen in Waldökosystemen verursachen können. Störungen sind Ereignisse die durch abiotische (z. B. Sturm, Schnee) oder biotische (z. B. Insekten, Pilze) Störfaktoren abrupt und teilweise großflächig Baummortalitäten verursachen. Störungsregime sind immanenter Bestandteil eines jeden Waldökosystems und nehmen u. a. durch das Schaffen von Verjüngungsnischen eine wichtige Rolle in der Selbstregulierung und Diversität von Ökosystemen ein. Infolge des Klimawandels und stark beeinflusst durch Bewirtschaftungseffekte (Baumartenzusammensetzung, Waldstrukturen) ist zu erwarten, dass sich die für bestimmte Regionen und Waldtypen bisher charakteristischen Störungsregime stark verändern werden (siehe Box 3.5. In den letzten Jahren sind etwa zunehmende Schäden durch Borkenkäfer in fichtendominierten Wäldern (insbesondere durch *Ips typographus* und *Pityogenes chalcographus*) – nicht mehr nur auf Tieflagen beschränk, was die Relevanz einer Klimaänderung für klimasensitive Störungsfaktoren deutlich demonstriert. Warme und trockene Jahre in Verbindung mit vorangegangenen großflächigen Störungen durch Sturm und Schnee ließen die Anteile von Kalamitätsnutzungen an den gesamten jährlichen Nutzungsmengen deutlich ansteigen. Folgen sind u. a. unmittelbare Entwertung von Sortimenten, sinkende Holzpreise durch plötzliches Überangebot auf den Holzmärkten sowie höherer Planungs- und Bewirtschaftungsaufwand. Der Einfluss von Klimaveränderungen auf Störungen wird auf der Ökosystemebene (Abschnitt 3.3.4) detaillierter dargestellt.

Klimawandelfolgen in Österreich

Von Steiner und Lexer (1998) wurde für Österreich zur Identifizierung von „hot spots" die physiologische Nische von

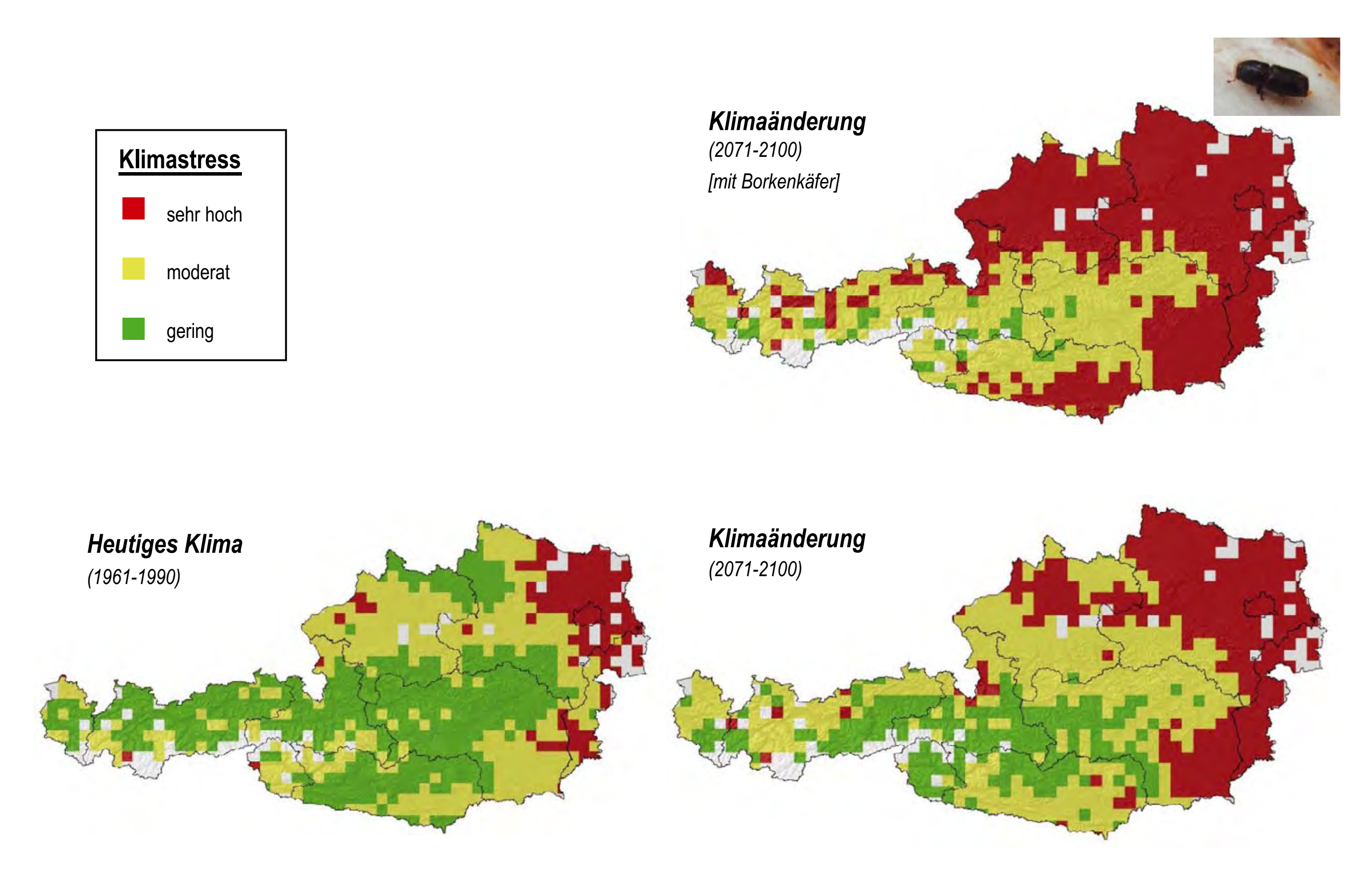


Abbildung 3.4 Modellierter Klimastress für die Fichte basierend auf dem Konzept der physiologischen Nische. Datenbasis: Standortdaten der Österreichischen Waldinventur (ohne Schutzwald außer Ertrag). Links unten: Heutiges Klima repräsentiert durch die Messperiode 1961 bis 1990; rechts unten: Klimaänderungsszenario A1B am Ende des 21. Jahrhunderts (Temperatur: bis +4,5 °C, Niederschlag: bis −35 % im Sommerhalbjahr); rechts oben: Klimaänderungsszenario A1B, physiologische Nische plus Berücksichtigung der potentiellen Generationen des Fichtenborkenkäfers *Ips typographus*. Rot = Klimastress sehr hoch, gelb = Klimastress moderat, grün = Klimastress gering bzw. nicht vorhanden

Figure 3.4 Simulated climate-related stress index for *Picea abies* based on the physiological niche concept. Data: Site data from Austrian Forest Inventory (exluding protection forests with out yield). Left bottom panel: current climate represented by period 1961 to 1990; right bottom panel: climate change scenario A1B at end of 21st century (temperature: up to +4.5 °C, precipitation: up to −35 % during summer season). Right top panel: climate change scenario A1B incl. effects of potential generations of the spruce bark beetle *Ips typographus*. Red = high stress, yellow = moderate stress, green = low/ no stress

Hauptbaumarten modellhaft anhand des Zusammenwirkens von Temperaturregime (Temperatursummen, Winterfrost, Sommerhitze), dem Sättigungsdefizit der Atmosphäre sowie der Wasserversorgung (Indikatoren für die Wasserverfügbarkeit während der Vegetationsperiode, Sommertrockenheit) beschrieben und das Auftreten von Klimastress unter heutigem Klima und einem Klimaänderungsszenario simuliert (Steiner und Lexer, 1998; Niedermair et al., 2007).

Abbildung 3.4 zeigt am Beispiel der Fichte die erwartete Entwicklung am Ende des 21. Jahrhunderts. Bei wärmerem und trockenerem Klima leidet die in Mitteleuropa von Natur aus auf montane bis subalpine oder inneralpine Lagen beschränkte Fichte zunehmend und häufiger unter periodischem Trockenstress. Unter Klimawandelbedingungen (für Details siehe die Bildunterschrift von Abbildung 3.4) werden große Gebiete Nieder- und Oberösterreichs sowie der Steiermark und des Burgenlandes für die Fichte ungeeignet, wobei diese Verengung der Nische noch durch ein in wärmerem Klima öfter zu erwartendes Massenauftreten des Borkenkäfers *Ips typographus* verstärkt wird. Gebiete in denen die Fichte geringem Klimastress ausgesetzt ist reduzieren sich unter den angenommenen Szenariobedingungen auf höher gelegene Berglagen.

Für die Buche hätte eine deutliche Erwärmung zur Folge, dass diese Baumart in den Gebirgslagen des gesamten Ostalpenraumes vermehrt Standorte mit geeigneten klimatischen Bedingungen vorfindet und nur mehr in Hochlagen durch Kälte limitiert wird (Abbildung 3.5). Sollten jedoch Trockenperioden häufiger und intensiver werden, würde dies auch zu einer starken Zunahme der durch Trockenstress belasteten Gebiete vor allem im Waldviertel sowie entlang des Alpenostrands

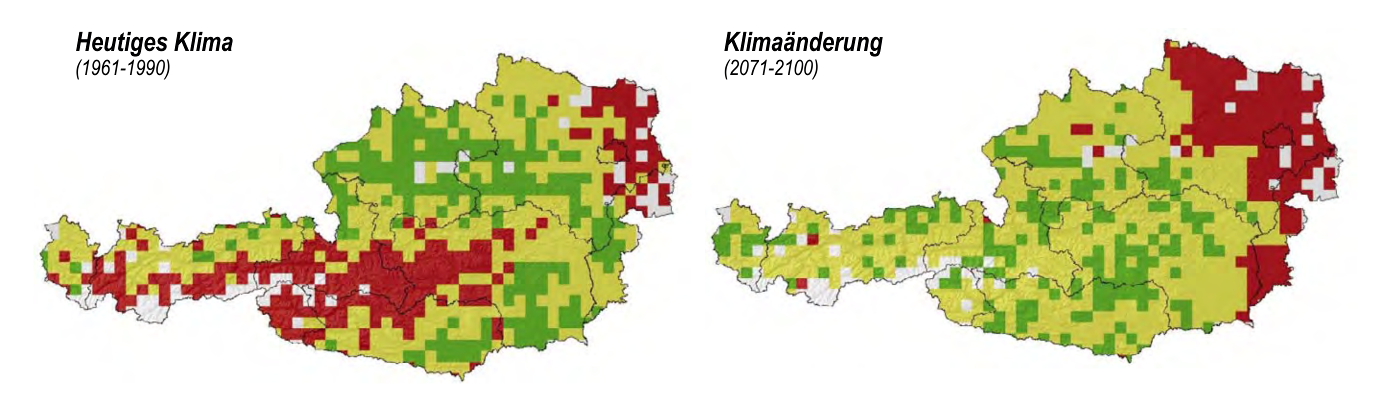


Abbildung 3.5 Modellierter Klimastress für die Buche basierend auf dem Konzept der physiologischen Nische. Datenbasis: Standortdaten der Österreichischen Waldinventur (ohne Schutzwald außer Ertrag). Links: Heutiges Klima repräsentiert durch die Messperiode 1961 bis 1990; rechts: Klimaänderungsszenario A1B am Ende des 21. Jahrhunderts (Temperatur: bis +4.5 °C, Niederschlag: bis −35 % im Sommerhalbjahr). Rot = hoher Klimastress, gelb = mäßiger Klimastress, grün = geringer Klimastress

Figure 3.5 Simulated climate-related stress index for *Fagus sylvatica* based on the physiological niche concept. Data: Site data from Austrian Forest Inventory (exluding protection forests without yield). Left bottom panel: current climate represented by period 1961 to 1990; right bottom panel: climate change scenario A1B at the end of 21st century (temperature: up to +4.5 °C, precipitation: up to −35 % during summer season). Red = high stress, yellow = moderate stress, green = low/no stress

bis ins südliche Burgenland führen. In Summe aber wird die Buche das für sie potentiell besiedelbare Areal in Österreich als Folge der Klimaänderung ausdehnen können.

Während in Abbildung 3.4 und Abbildung 3.5 der potentielle Klimastress für einzelne Baumarten an Standorten in Österreich wissensbasiert abgeschätzt wird (Steiner und Lexer, 1998; Niedermayr et al., 2007), gibt es auch Ansätze, die anhand von Daten aus Großrauminventuren mit statistischen Methoden Beziehungen zwischen Standort- und Klimaparametern sowie dem Auftreten einer Baumart kalibrieren und diese Modelle dann zur Abschätzung des potentiellen Vorkommens unter Klimaänderungsbedingungen einsetzen (z. B. Zimmermann et al., 2013).

Der direkte Vergleich dieser beiden Nischenmodellansätze ist nur sehr schwer möglich. Teilweise zeigen die statistisch ermittelten Nischenmodelle (Zimmermann et al., 2013) mit ökophysiologischen Nischenansätzen idente Ergebnisse. Es treten jedoch auch widersprüchliche Ergebnisse auf. Die Fichte etwa ist im statistischen Modellkonzept in Abbildung 3.6 in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts im Mühlviertel vertreten während im ökophysiologischen Konzept (Abbildung 3.4) praktisch nur mehr der Alpenhauptkamm befriedigende Bedingungen für Fichten aufweist. Die Interpretation der wissensbasierten ökophysiologischen Nischenmodelle ist sehr einfach möglich (d. h. im Sinne der „Eignung einer Baumart"), bei den statistischen Nischenmodellen bleiben Ursache-Wirkungsbeziehungen und der Interpretationsspielraum bei der geschätzten „Auftretenswahrscheinlichkeit" vielfach unbekannt.

Ein weiteres quantitatives Modell der ökologischen Nische von Waldbaumarten wurde von Kölling (2007) für Deutschland vorgestellt. Hierzu wurden Karten von Vegetationstypen verwendet um einen Datensatz zu Absenz bzw. Präsenz von Baumarten zu generieren, der wiederum dazu verwendet wurde, sogenannte baumartenspezifische Klimahüllen zu entwickeln.

3.2.7 Einjährige landwirtschaftliche Nutzpflanzen

Abgrenzung und Bedeutung

Winterungen einjähriger Nutzpflanzen, wie diverse Wintergetreidearten oder Raps, werden typischerweise im Herbst angebaut, überwintern in weiterer Folge und starten als Jungpflanzen in die Wachstumsperiode des neuen Jahres. Dies bedingt einen Entwicklungsvorsprung gegenüber Sommerungskulturen mit früherer Reife und Ernte. Viele Winterungskulturen, wie Wintergetreide, sind im Jugendstadium auf niedrige Temperaturen als Voraussetzung für ihren Entwicklungszyklus angewiesen („Vernalisation"), profitieren in trockenen Regionen wesentlich von der Winterfeuchte, also den höheren Bodenwassergehalten während ihrer Wachstumsphase, sind aber auch Frost und Nässe mehr ausgesetzt als Sommerungskulturen (Kersebaum und Eitzinger, 2009).

Sommerungen werden als einjährige Nutzpflanzen (Mais, Sommergetreide, Zuckerrübe, Sonnenblume, Gemüsearten, usw.) im Frühjahr angebaut und befinden sich je nach Kultur bis in den Sommer oder bis hin zum Herbst in der Wachstumsphase. Dadurch sind sie im Mittel häufiger Sommertrockenheiten und Hitzeperioden ausgesetzt als typische Winterun-

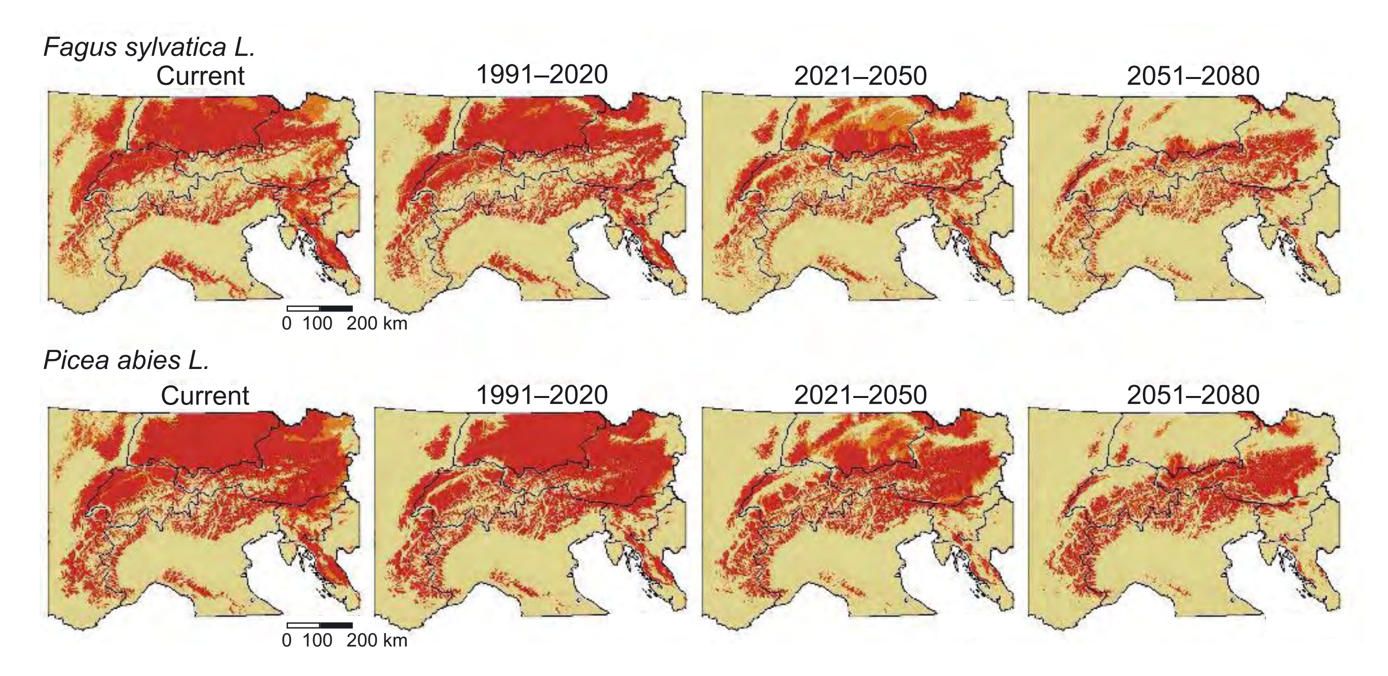


Abbildung 3.6 Potentielle Verbreitung von Buche und Fichte in mehreren Zeitfenstern während des 21. Jahrhunderts. Das verwendete Klimaänderungsszenario beinhaltet eine Erwärmung von etwa 3 °C und eine 10 %ige Abnahme der Sommerniederschlage bis 2051/80. Rot = die Baumart kommt wahrscheinlich vor, orange = die Baumart kommt möglicherweise vor, grau = die Baumart kommt potentiell nicht vor. Quellen: Zimmermann et al. (2013), Jandl et al. (2012)

Figure 3.6 Potential future distributions of *Fagus sylvatica* and *Picea abies* during the 21st century. The climate scenario assumes a warming of 3 °C and a decline in summer precipitation by 10 % until 2051/80. Red = presence of tree species is very likely, orange = moderate likelihood of tree species presence, grey = presence of tree species is unlikely. Source: Zimmermann et al. (2013), Jandl et al. (2012)

gen. Mehrjährige Kulturen, wie im Futterbau, können unter diesem Aspekt zu Sommerungen gezählt werden, obwohl sie durch die Überwinterung auch vom Winterhalbjahr beeinflusst werden. Ihr Vorteil kann jedoch eine tiefere Durchwurzelung und die damit verbundene bessere Erschließung von Wasservorräten sein.

Im Jahr 2012 wurde in Österreich eine Ackerfläche von 1,35 Mio. ha bewirtschaftet (vgl. landwirtschaftliche Landnutzung, Band 3, Kapitel 2). Das entspricht 16,2 % der österreichischen Staatsfläche. Den größten Anteil des Ackerlandes nahm der Getreideanbau mit rund 60 % ein, wobei hier der Winterweichweizen mit ca. 280 000 ha vor Körnermais mit ca. 220 000 ha die bedeutendste Rolle spielt (BMLFUW, 2013).

Feldfutterbau beansprucht nach Angaben im Grünen Bericht (BMLFUW, 2013) 18,0 % des Ackerlandes, Ölfrüchte (inkl. Raps) 10,6 %. Hackfrüchte (inkl. Zuckerrübe mit ca. 50 000 ha) sind auf 5 % der Ackerflächen zu finden, während Körnerleguminosen (Erbsen und Pferdebohnen) nur 1,6 % des Ackerlandes ausmachen. 3,0 % des Ackerlandes liegen brach.

Raps hat in den vergangenen Jahren in Mitteleuropa vor allem durch seine Verwendung als Energiepflanze flächenmäßig an Bedeutung gewonnen. Spezialkulturen, wie zahlreiche Nutzpflanzen im Gemüsebau, sind flächenmäßig weitaus weniger bedeutend und in den jeweiligen Anbauregionen (Eferdinger Becken oder Marchfeld) konzentriert vorzufinden.

Sensitivität in Bezug auf Klimavariable

Eine allgemeine Charakterisierung der physiologischen Reaktion von C3- und C4-Pflanzen auf Umweltfaktoren, insbesondere das Temperatur- und Wasserversorgungsregime findet sich in Abschnitt 3.2.5 gegeben. Beispiele für C3-Nutzpflanzen sind Weizen, Roggen, Hafer oder Reis, für C4-Pflanzen Mais, Zuckerrohr oder Hirse.

Die Produktivität von Nutzpflanzen kann insbesondere von Wetterextremen negativ beeinflusst werden. Zum Beispiel können leichte Hagelschäden oder mechanische Schäden durch starke Windböen vermehrt Fusariumbefall auslösen und damit die Toxinbelastung des Ernteproduktes erhöhen.

Auch Gasbestandteile der Luft beeinflussen das Pflanzenwachstum. Bodennahes Ozon, das während Hitzeperioden verstärkt auftritt, schädigt zum Beispiel den Spaltöffnungsmechanismus. Kohlendioxid hingegen wirkt stimulierend auf die Photosyntheseleistung. C3-Pflanzen reagieren stärker auf einen steigenden Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre, als C4-Pflanzen. Allerdings ist diese Reaktion von Umweltfaktoren

und genetischen Faktoren abhängig. Zum Beispiel zeigte die Zuckerrübe in Experimenten geringere Reaktionen auf eine höhere CO_2-Konzentration der Atmosphäre (Schaller und Weigel, 2007) als Getreidearten, wobei es auch hier Sortenunterschiede gibt.

Klimawandelfolgen in Österreich

Die in den nationalen Ertragsstatistiken europäischer Länder der vergangenen Jahrzehnte sichtbaren Ertragssteigerungen sind primär dem Fortschritt bei Agrartechnik, agro-chemischen Maßnahmen und in der Pflanzenzüchtung zuzuschreiben (Kersebaum und Eitzinger, 2009). Neben diesem positiven Ertragstrend zeigt sich vor allem in der Schweiz und Österreich eine Zunahme der zwischenjährlichen Ertragsvariabilität (Peltonen-Sainio et al., 2010), die zum Teil auf klimawandelbedingte Faktoren zurückgeführt wird. Es muss allerdings bei nationalen Ertragsstatistiken darauf hingewiesen werden, dass es sich dabei um aggregierte Werte handelt, die für regional differenzierte Aussagen wenig geeignet sind. So ist durchaus anzunehmen, dass in den humideren bzw. höher gelegenen kühleren Regionen das Ertragspotenzial beispielsweise für Getreide oder im Futterbau durch den Klimawandel im Gegensatz zu heute schon trockeneren und wärmeren Regionen in Mitteleuropa zunimmt (Fuhrer et al., 2007; Eitzinger et al., 2013).

Nicht bewässerte Sommerkulturen mit geringeren Temperaturansprüchen (Sommergetreide, Zuckerrübe, Kartoffel, usw.) werden zunehmend von Hitzestress und Trockenschäden betroffen sein, ihr Ertragspotenzial wird stagnieren bis zurückgehen, insbesondere auf leichten Böden mit geringer Wasserspeicherkapazität. Wärme liebende Sommerkulturen wie Mais, Sojabohne oder Sonnenblume können durch die zunehmenden Temperaturen im Ertragspotenzial profitieren, solange die Wasserversorgung nicht limitierend wirkt. Winterkulturen, wie z. B. Winterweizen, könnten tendenziell ein ansteigendes Ertragspotential aufweisen, da sie die Winterfeuchte in den Böden besser nutzen. Allerdings besteht an nassen Standorten oder in niederschlagsreichen Regionen zunehmend auch die Gefahr von Staunässe wegen zunehmender Niederschläge im Winterhalbjahr. Auch droht Winterkulturen bei wärmeren Wintern zunehmend Gefahr von Seiten der Schädlinge und Krankheiten. Bei bewässerten Kulturen besteht ein zunehmender Wasserbedarf, möglicherweise müssen bisher nicht bewässerte Kulturen regional zunehmend bewässert werden.

Die erwartete Zunahme der Vegetationsperiodenlänge um durchschnittlich ca. 8 Tage / Jahrzehnt in den nächsten Jahrzehnten (Band 1, Kapitel 4) bedingt eine entsprechende Vorverschiebung der Pflanzenphänologie als auch der damit verbundener Feldarbeiten (Anbau, Düngung, Ernte). Die Entwicklung der Pflanzen beschleunigt sich, damit werden an die Phänologie gebundene Arbeiten immer früher stattfinden (früherer Anbau, frühere Erntetermine, Verschiebung bei den Pflegemaßnahmen). Durch heißere Sommer wird es insgesamt zwar mehr Feldarbeitstage im Sommer geben, die Arbeitsspitzen werden aber immer früher stattfinden. Dadurch könnten sich schlechtere Bedingungen für Feldarbeiten, insbesondere bei frühem Anbau einstellen (Eitzinger et al., 2013).

Eine mögliche Zunahme von klimatischen Extremereignissen bewirkt eine Zunahme der jährlichen Ertragsschwankungen in der landwirtschaftlichen Produktion. Dazu zählen insbesondere Hitzeperioden und Trockenheit, aber auch durch Starkniederschlag verursachte Bodenerosion oder Auswinterungsschäden, regionale Sturmschäden (vor allem durch heftigere Gewitter) sowie regional Frost- und Hagelschäden.

Es sind deutliche Änderungen bei Unkräutern, Schädlingen und Krankheiten zu erwarten (Weigand und Tischner, 2007; Glauninger und Kersebaum, 2009; Kocmancova et al., 2010). Vor allem wärmeliebende Insekten können sich stärker ausbreiten (neue Schädlinge, höhere Überwinterungsraten, raschere Ausbreitung oder zusätzliche jährliche Generationen). Viele Pilzkrankheiten könnten in den trockeneren Regionen eher zurückgehen, allerdings haben auch andere Faktoren, wie eine schnellere Entwicklung der Pflanzen einen Einfluss auf den Befallsdruck. Es könnte zu einer Ausbreitung wärmeliebender und wurzelbetonter Unkrautarten (vor allem hitze- und trockentolerante Arten) kommen. Siehe auch Abschnitt 3.2.9 („Schadorganismen an Nutzpflanzen“).

Die nachfolgend genannten Erkenntnisse zu den Auswirkungen von Klimaszenarien auf die Produktivität von Nutzpflanzen in Österreich basieren meist auf den A1B- und A2-Szenariosimulationen mehrerer globaler Klimamodelle. Die saisonalen Klimasignale (im Vergleich zur Bezugsperiode 1961 bis 1990) der verwendeten Klimaszenarien (Kombinationen von Klimamodell und Emissionsszenario) liegen in den weiter unten diskutierten Studien für 2050 (als Orientierungshilfe) bei der Temperatur bei +2 bis +3 °C (ganzjährig) und beim Niederschlag bei ca. +4 bis +20 % (Okt. bis Apr.) sowie −1 bis −40 % (Mai bis Sept.).

Winterweizen

Für verschiedene Standorte in Nord-Österreich zeigen Simulationsrechnungen für Weizen in der Periode um 2050 gegenüber dem Referenzzeitraum 1961 bis 1990 einen Rückgang der Erträge um −2 bis −8 % (Alexandrov et al., 2002) ohne

Berücksichtigung des CO_2-Düngungseffekts. Mit Berücksichtigung der Wirkung einer erhöhten atmosphärischen CO_2-Konzentration auf die Photosynthese verschiebt sich die Schätzung in den positiven Bereich und zeigt Ertragszuwächse von +4 bis +11 % (Kersebaum et al., 2008; Fuhrer, 2003; Strauß et al., 2012). Die weiteren Aussichten für den Zeitraum bis 2080 weisen eine weitere Verstärkung der Trends sowohl in negativer wie auch in positiver Richtung mit CO_2-Effekt aus (Eitzinger et al., 2003).

Neuere Studien für Österreich (Thaler et al., 2012; Eitzinger et al., 2013) berücksichtigen auch den Einfluss verschiedener Bodenklassen und bereits angepasster Saattermine auf die Erträge. Die raschere Abtrocknung der flachgründigen Böden kann vermehrt Trockenstress während der besonders empfindlichen Phasen der Blüte und Kornfüllung verursachen. Auf den besseren landwirtschaftlichen Böden verliert die nutzbare Feldkapazität als limitierender Faktor an Bedeutung. Eine Steigerung der nutzbaren Feldkapazität von 200 auf 300 mm im gesamten Wurzelraum führt hier kaum mehr zu einer Ertragssteigerung. Auch auf diesen Böden stellt Wasser einen wesentlichen limitierenden Faktor dar, wobei hier jedoch die Witterung ausschlaggebend ist. Trotz möglicherweise steigender Sommertrockenheit nimmt die durchschnittliche Belastung von Winterweizen durch Trockenstress ab und es kann für fast jede Bodenklasse mit einem Anstieg des Winterweizenertrags gerechnet werden. Der negative Effekt der verkürzten Wachstumsperiode des Winterweizens wird durch den simulierten CO_2-Düngungseffekt bzw. den früheren Wachstumsbeginn überkompensiert. Trotz dieses positiven Bildes zeigt sich aber auch, dass die Unterschiede im Ertragspotenzial zwischen den Bodenklassen und damit die regionalen Unterschiede tendenziell zunehmen.

Der fallweise simulierte positive Effekt auf das Ertragspotenzial sagt jedoch noch nicht aus, dass dies auch für die realen Erträge gelten muss, wenn bisher nicht berücksichtigte aber potentiell stärker werdende Schadfaktoren wirksam werden, wie deutlich zunehmende Witterungsextreme oder Schädlingsbefall. Simulationsstudien für Trockengebiete in Tschechien, Slowakei, Österreich und Deutschland weisen auf zusätzlichen Wasserbedarf der Nutzpflanzen zur Erhaltung eines optimalen Ertrages hin (Thaler et al., 2012; Eitzinger et al., 2013; Kersebaum und Eitzinger, 2009). Für das Marchfeld in Österreich ergab sich ein Zusatzwasserbedarf bei Winterweizen von ca. 30 mm (entspricht ungefähr einer Beregnungsgabe) für die 2050er Jahre (mit CO_2-Effekt, auf mittelschwerem Boden). Auch weisen manche Simulationen auf steigende Nitratauswaschung unter Klimaszenarien hin (Strauß et al., 2012; Thaler et al., 2012).

Wintergerste

Für Wintergerste liegen nur wenige Abschätzungen für die zukünftige Entwicklung vor. Obwohl die Reaktionen auf Klimafaktoren und steigende CO_2-Konzentration grundsätzlich ähnlich wie bei Weizen sind, ist durch die frühere Entwicklung der Wintergerste eine etwas geringere Empfindlichkeit gegenüber sommerlichen Hitze- und Trockenperioden zu erwarten. Andererseits ist bei niedrigeren Temperaturen auch mit einer geringeren Stimulierung des Wachstums durch die höhere CO_2-Konzentration zu rechnen (Schaller und Weigel, 2007). Durch langfristig wärmere Wintermonate unter Klimaszenarien besteht die Gefahr, dass die Winterhärte der Gerste abnimmt und dadurch die Auswinterungsgefahr (neben zunehmender Gefahren durch Krankheiten) in einzelnen Jahren steigt (Schaller und Weigel, 2007).

Raps

Für Raps liegen keine Untersuchungen vor. Die Entwicklung von Winterraps könnte jedoch durch wärmere Winter begünstigt werden. Frostschäden sollten eher zurückgehen, vorausgesetzt es treten keine Anpassungen bezüglich der Winterhärte ein. Allein die schnellere Entwicklung durch die höheren Temperaturen könnte im Frühsommer zu einer Beschleunigung der Abreife und damit zu geringeren Erträgen führen. Bei Zunahme der Sommertrockenheit könnte der Winterraps vor allem nach relativ spät räumenden Vorfrüchten in der Anfangsphase betroffen sein, da zu trockene Bodenverhältnisse das Auflaufen und die Etablierung des Vor-Winterbestandes behindern könnten.

Weitere Winterungskulturen

Andere eher frostempfindliche Winterformen von Kulturarten wie Ackerbohnen könnten in Zukunft deutlich an Produktionspotenzial gewinnen und zunehmend auch typische Sommerungsfrüchte ersetzen. Neue Zuchtformen, die zukünftigen Klimabedingungen angepasst sind, lassen in Zukunft ein entsprechend größeres Sortenspektrum erwarten, das für den Anbau zur Verfügung steht.

Mais

In den meisten Klimawandelstudien wird Mais, abgesehen von einigen trockenen Regionen, als Gewinner des Klimawandels in Mitteleuropa beschrieben (d.h. mit steigendem Ertragspotenzial, vorausgesetzt man steigt auf späterreifende

Sorten um), obwohl beim Mais als C_4-Pflanze eine höhere atmosphärische CO_2-Konzentration kaum ertragssteigernd wirkt (Eitzinger et al., 2009a).

Da in Österreich in den wichtigen Maisanbaugebieten später reifende Sorten angebaut werden könnten, wäre eine Erwärmung im langjährigen Mittel hinsichtlich des Ertragspotenzials bei Mais positiv zu beurteilen. Dies bestätigen auch zahlreiche europaweite Simulationsstudien, welche für die temperaturlimitierten Maisanbaugebiete vorwiegend zunehmende Ertragspotenziale vorhersagen, vorausgesetzt, die Wasserversorgung während der Vegetationsperiode ist weitgehend sichergestellt.

Ein hohes Schadpotenzial haben bei Mais allerdings Witterungsextreme, welche regional unter den Bedingungen von Klimaszenarien durchaus zu einem zunehmenden Problem werden könnten (vgl. Sensitivität der Nutzpflanzen in Abschnitt 3.2.7).

Das Produktionspotential von Mais dürfte in Österreich unter Klimawandelszenarien der nächsten Jahrzehnte insbesondere in den derzeit kühleren und niederschlagsreicheren Regionen, wie Oberösterreich, stark ansteigen (Eitzinger et al., 2009b). Aber auch Regionen mit zusätzlich nötiger Bewässerung für Mais dürften sich in den kommenden Jahrzehnten in Österreich ausweiten, bzw. neu entwickeln (zum Beispiel Teile der Südoststeiermark, auf Schotterböden der Welser Heide im zentralen Oberösterreich). Dort wo schon bewässert wird, wird mit wärmeren und trockeneren Bedingungen der Bestandswasserbedarf von Mais weiter ansteigen.

Die Grenze für den Körnermaisanbau dehnt sich in Österreich langsam in größere Höhenlagen aus. So könnte Körnermais von den klimatischen Bedingungen her zunehmend in jetzt typische Silomaisgebiete (vorwiegend Futterbauregionen) des Alpenvorlandes (etwa über 500 m Seehöhe, zum Beispiel die „Bucklige Welt" am Ostalpenrand Österreichs) oder von Mittelgebirgen (zum Beispiel der böhmischen Masse) vordringen, soweit dies sonstige Bedingungen zulassen.

Hinterholzer (2004) berichtet über zunehmende Jahrestemperatursummen (um 200–300 °C) in drei klimatisch unterschiedlichen österreichischen Maisanbaugebieten von Oberösterreich, der Steiermark und dem Burgenland im Zeitraum 1970 bis 2000. Am kühleren Standort Lambach erhöhte sich die Temperatursumme für die Wachstumsperiode des Maises zum Beispiel von 900 auf 1 200 °C mit bis heute weiter steigender Tendenz. An allen drei Versuchsstandorten wurden in diesem Zeitraum deutlich abnehmende Kornfeuchtigkeiten bei der Abreife in der jeweiligen Reifeklasse gemessen. Der praktische Anbau hat in diesen Regionen bereits darauf reagiert, sodass heute bereits Sorten mit höheren Reifezahlen angebaut werden als in den kühleren 1970er-Jahren.

Die Erwärmung hat auch deutliche Auswirkungen auf den Krankheits- und Schädlingsbefall von Mais (Zunahme der Blattflecken [*H. turcicum*], des Maiszünslers, Verschiebung der Artenspektren bei Fusarium) und auf die Ausbreitung bestimmter Beikräuter (Glauninger und Kersebaum, 2009; Grünbacher et al., 2006). In den letzten Jahren hat sich insbesondere der Maiswurzelbohrer (Pilz und Kahrer, 2012; AGES, 2012) in Österreich ausgebreitet. Maßnahmen in Bezug auf Fruchtfolge und Anbaudichte sind ausstehend.

Sommergetreide

Für Sommergetreide wie Sommerweizen oder -gerste dürften sich in den trockenen Regionen unter Klimawandelszenarien auch trotz. Berücksichtigung des CO_2-Effektes leicht abnehmende Erträge ergeben, vor allem wegen zunehmender Wasserknappheit während des Sommers. Als Beispiel sei hier das Marchfeld angeführt, wo Simulationsanalysen für die Periode um 2050 für Sommergerste eine je nach Bodenwasserspeicherfähigkeit unterschiedlich starke Ertragsabnahme bzw. Zunahme von Trockenstress der Gerste zeigen; der Effekt ist umso stärker je weniger Wasserspeichervermögen der Boden hat (Thaler et al., 2012; Eitzinger et al., 2013). Für andere Getreidearten wie für Hafer gelten dieselben Prinzipien hinsichtlich der Auswirkungen.

Zuckerrüben

Für Zuckerrüben bedeutet die Erwärmung zunächst eine Verlängerung der mittleren Wachstumsperiode, da die Erwärmung keine vorzeitige Abreife verursacht wenn sich die Pflanze im gesamten Jahr im vegetativen Stadium befindet. Limitierend könnte sich jedoch das Wasserangebot auswirken, da bei abnehmenden Sommerniederschlägen zunehmend mit Trockenstress zu rechnen ist. Auch könnten sich höhere Nachttemperaturen insbesondere im Herbst negativ auf die Zuckerausbeute auswirken. Europaweit wird eine Verschiebung der Anbauflächen in Richtung Norden erwartet (Jones et al., 2003). In Österreich zeichnet sich in den trockenen Regionen, wie im Marchfeld bereits ein Rückgang des Zuckerrübenanbaues ab, vor allem im Zusammenhang mit einer entweder nicht mehr kostendeckenden Bewässerung oder mangelnder Infrastruktur für zusätzliche Bewässerung. An diesem Beispiel zeigt sich, dass Klimawandelfolgen anhand von Verhaltensindikatoren meist vieldeutig zu interpretieren sind.

Kartoffel

Ähnlich wie für die Zuckerrübe sind die Auswirkungen für den Kartoffelanbau einzuschätzen. Die Verlängerung der Vegetationszeit dehnt die potenzielle Anbauperiode aus und erlaubt eine höhere Flexibilität. Da Kartoffeln im Gegensatz zu Zuckerrüben an Standorten mit leichteren, sandigen Böden zu finden sind, dürfte die Anfälligkeit gegenüber sinkenden Sommerniederschlägen tendenziell höher sein bzw. die Notwendigkeit für Bewässerung bzw. die Bewässerungsmenge stärker ansteigen. Dies gilt vor allem für die wärmeren Anbauregionen, wie das Marchfeld im Osten Österreichs, aber auch für die höher gelegenen, kühleren Standorte mit sehr flachgründigen Böden, wie zum Beispiel im Waldviertel, und generell für Gebiete nördlich der Donau in Österreich. Im Waldviertel kann es zum Beispiel notwendig werden, zusätzlich Bewässerung einzuführen, wobei in dieser Region die Verfügbarkeit von Bewässerungswasser zu einem Problem werden könnte (geringe Grundwasserreserven, hügeliges Terrain).

Der Kartoffelanbau ist bezüglich möglicher Auswirkungen im Schädlings- und Krankheitsauftreten stark betroffen. Es könnte sein, dass sogenannte „Gesundungsgebiete“ in den kühleren Regionen (oft als Vermehrungs- und Züchtungsstandorte genutzt) aufgrund der zunehmenden Verbreitung von Viruskrankheiten bzw. derer Vektoren ihre Funktion nicht mehr zufriedenstellend erfüllen können (zum Beispiel Gebiete im Wald- und Mühlviertel Österreichs). Andererseits können trockenere Bedingungen durch schlechtere Ausbreitungsmöglichkeiten für Pilzkrankheiten dem Gesundheitszustand der Kartoffel nützen und den Pflanzenschutzaufwand verringern, der allein zur Bekämpfung bzw. Vorbeugung der Kraut- und Knollenfäule einen beträchtlichen Einsatz erfordert.

Weitere Sommerkulturen

Für andere Sommerkulturen liegen nur wenige regionale Simulationsstudien vor. Europäische Untersuchungen, wie ACCELLERATES (Audsley et al., 2006), welche die Auswirkungen des Klimawandels auf verschiedene Kulturen auf einer größeren räumlichen Skala abschätzen, bestätigen regionale Studien, dass wärmeliebende Kulturen insgesamt ein größeres Produktionspotenzial unter Klimaszenarien aufweisen werden. Für Mitteleuropa wird unter Berücksichtigung des CO_2-Düngungseffektes in Szenarien mit maximal moderatem Niederschlagsrückgang im Sommerhalbjahr zum Beispiel eine deutliche Zunahme der Sojabohnenerträge erwartet. Aber auch Mais, und Sonnenblume würden demnach mit Ertragssteigerungen von bis zu 30 % und mehr bis zu den 2050er-Jahren deutlich profitieren. Trockenstressempfindliche Sommerkulturen würden in den Erträgen eher nachgeben oder weniger zunehmen, wie vor allem Sommergetreide, Kartoffel oder Grünland. Dies kann allerdings regional, in einer kleineren räumlichen Skala, je nach Standortbedingungen und zugrunde gelegtem Klimaszenario ein sehr unterschiedliches Bild ergeben.

Gemüsekulturen

Diese Kulturen zeichnen sich, von einigen Ausnahmen abgesehen, durch eine relativ kurze Wachstumsperiode, hohen Wasserbedarf und notwendige gleichmäßige Wasserversorgung (wegen des meist nur flachgründigen Wurzelsystems) aus. Sie erfordern hohe Investitionen pro Flächeneinheit, weisen dafür einen hohen Deckungsbeitrag auf und werden intensiv betreut, um alle Wachstumsfaktoren zu optimieren. So werden diese Kulturen, wenn nötig, größtenteils bewässert, so dass die in den Klimaszenarien angegebenen abnehmenden Niederschläge keine direkte Schadwirkung hervorrufen werden. Lediglich der durch die zunehmenden Verdunstungsraten erhöhte Wasserbedarf für die Bewässerung könnte regional zu einem Problem werden, wenn zum Beispiel Grundwasserstände langfristig zu stark absinken und damit zusammenhängende Nutzungsbeschränkungen erlassen werden bzw. sich die Wassernutzung verteuert (EEA, 2008).

Der größte Vorteil beim Anbau von Gemüsekulturen wird wahrscheinlich aus einer Verlängerung der Vegetationsperiode resultieren, die unter Umständen wegen der kurzen Vegetationszeit der Kulturen einen zusätzlichen Anbauzyklus pro Jahr erlaubt. Die bei einem sehr frühen Anbau notwendige Verwendung von Folien zur Förderung des Jugendwachstums durch Erhöhung der Bodentemperatur könnte teilweise entfallen (außer Bodenfolien oder Folientunnel werden als Verdunstungsschutz eingesetzt). Auf der anderen Seite ist vor allem der deutlich zunehmende Trend zu mehr Hitzeperioden mit damit verbundenem Hitzestress zu nennen, der insbesondere in Folientunneln und schlecht regulierbaren Glashäusern zu zunehmenden Problemen durch Überhitzung führen kann. Extrem hohe Bodentemperaturen könnten wegen der oft nicht geschlossenen Bestände beim Gemüse (offener, abgetrockneter oder dunkler Boden erhitzt wesentlich stärker bei Sonneneinstrahlung als bedeckter Boden) zunehmend zu einem Problem für die Pflanzen werden. Hier spielen negative Auswirkungen auf das Wurzelwachstum oder mögliche Förderung von Wurzelkrankheiten und Schadinsekten eine wichtige Rolle. Die Kombination von durchschnittlich erhöhten Temperaturen

und vermehrter Bewässerung schafft ein feucht-warmes Mikroklima, welches das Auftreten von bestimmten Pilzkrankheiten begünstigt, die wegen der hohen Flächenproduktivität ein besonders hohes Schadpotenzial aufweisen.

3.2.8 Landwirtschaftliche Dauerkulturen

Abgrenzung und Bedeutung

Der Obst- und Weinbau hat in Österreich regionale Schwerpunkte: Der Weinbau in den klimatisch warmen Regionen der Steiermark, Niederösterreichs und des Burgenlandes, der Obstbau in den humid warmen Klimaregionen der Steiermark. Der Erwerbsobstbau wird in Österreich auf etwa 11 000 ha (großteils in Form von Apfelproduktion) betrieben. Der Weinbau umfasst für 2012 eine Anbaufläche von etwa 43 600 ha (BMLFUW, 2013).

Sensitivität in Bezug auf Klimavariable

Die mehrjährigen, landwirtschaftlich genutzten Wein- und Obstbaukulturen weisen im Allgemeinen eine höhere Sensitivität in Bezug auf den Klimawandel auf. Dauerkulturen sind der ganzjährigen Witterung ausgeliefert und ökonomisch meist durch hohe und längerfristig gebundene Investitionen gekennzeichnet, was eine mittelfristig nur wenig oder nur mit hohem Aufwand veränderbare Produktionstechnik bedingt. Auswirkungen des Klimawandels auf Dauerkulturen müssen daher aufmerksam verfolgt werden, um rechtzeitig kurz- und langfristig sinnvolle Anpassungsmaßnahmen setzen zu können (siehe dazu Band 3).

Bei Dauerkulturen werden die Wachstumsperiode und die phänologische Entwicklung der Pflanzen in Abhängigkeit ihrer Bedürfnisse stark von der Temperatur bzw. den Temperatursummen gesteuert. Höhere Temperaturen lassen einen Trend zur früher einsetzenden und insgesamt schneller ablaufenden phänologischen Entwicklung erkennen. Insbesondere milde Winter und Frühjahre beschleunigen die phänologische Entwicklung in den frühen Entwicklungsphasen, begünstigen andererseits aber auch das Potenzial für Frostschäden. Auf den Blühbeginn des Weines zum Beispiel haben vor allem die Temperaturen im Mai einen großen Einfluss. Die Temperaturen beeinflussen auch die Inhaltsstoffe, wie z. B. den steigenden Zuckergehalt der Trauben bei höheren Temperaturen. Eine frühe Rebenphänologie bedeutet auch, dass die reifenden Beeren insgesamt höheren Temperaturen am Stock ausgesetzt sind. Dies führt in Kombination mit höheren Zuckergehalten und niedrigeren Säuregehalten der Beeren bei feuchten Witterungsbedingungen zu einem erhöhten Befallsdruck durch Fäulniserreger (Eitzinger et al., 2009c).

Während Wein abgesehen vom Jugendstadium relativ trockenresistent ist, reagieren Obstkulturen (vor allem Apfelkulturen) empfindlich auf Trockenheit und sind daher eher auf Bewässerung oder humide Regionen angewiesen. Dauerkulturen sind insbesondere durch Extremwetterereignisse gefährdet, was gerade aufgrund des hohen flächenbezogenen Deckungsbeitrags von großer ökonomischer Bedeutung ist. Hierbei sind insbesondere Schäden durch Hagel oder Extremniederschläge zu nennen, im Obstbau auch Hitze- und Frostschäden.

Klimawandelfolgen in Österreich

Auswirkungen des Klimawandels auf landwirtschaftliche Dauerkulturen (Wein- und Obstbau) zeichnen sich bereits seit längerer Zeit ab.

Weinbau

In Österreich würde ein weiterer Temperaturanstieg in den nächsten Jahrzehnten den Weinbau begünstigen. In den bestehenden Weinanbaugebieten würde sich ein Temperaturanstieg besonders günstig auf Rotweinsorten bzw. auf die Rotweinqualität auswirken. Weißweinsorten, bei denen der Säuregehalt ein wesentliches Qualitätsmerkmal ist, könnten in kühleren oder neuen Anbaugebieten an Qualität gewinnen bzw. in bisherigen Anbaugebieten an Qualität einbüßen.

Welche Veränderungen der flächenmäßigen Ausweitung des klimatischen Potenzials für den Weinanbau sich für Klimaänderungsszenarien ergeben, kann aufgrund von für den Weinbau abgestimmten klimatischen Indizes, wie dem HUGLIN Index (Wärmesumme über 10 °C von April bis September), abgeschätzt werden. Abbildung 3.7 zeigt den historischen Trend des Huglin-Index für einige repräsentative Wetterstationen typischer Weinbauregionen seit 1961.

Für eine genauere Bewertung von Standorten und eine optimale Abstimmung der Produktionstechnik müssen alle Standortfaktoren berücksichtigt werden. Einen Eindruck dazu liefert eine aktuelle, räumlich hoch aufgelöste Analyse des Weinanbaugebietes „Carnuntum“ in Ostösterreich (Eitzinger et al., 2012b). Der tatsächliche Weinanbau wird durch frostgefährdete Tallagen beschränkt. Diese haben zwar im Normalfall die höchsten Temperatursummen und simulierten Mostgewichte, der Weinanbau kann aber aufgrund der bisherigen Frostgefährdung zum größten Teil nicht dauerhaft, oder nur unter Inkaufnahme von Frostschäden stattfinden. Deutlich kommt der Einfluss der Hangausrichtung und des

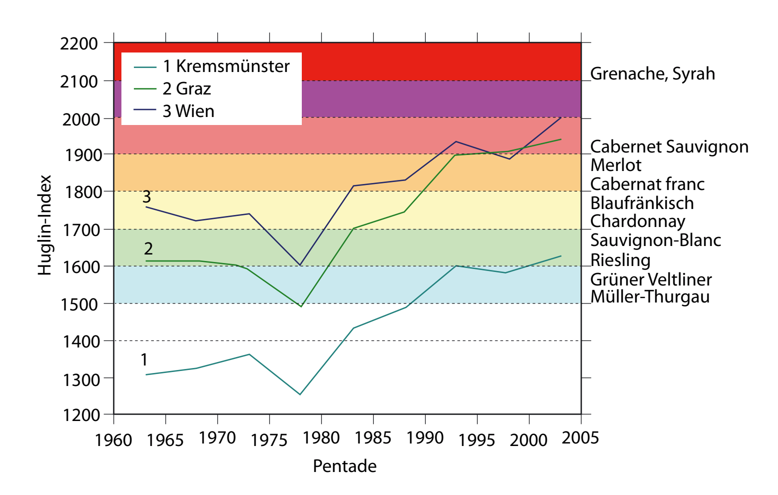


Abbildung 3.7 Entwicklung des Huglin-Index (Wärmesumme über 10 °C von April bis September) seit 1961 für verschiedene meteorologische Stationen in Österreich. Farbgebung charakterisiert the Huglin-Bereich für spezifische Rebsorten. Quelle: Eitzinger et al. (2009c)

Figure 3.7 Development of Huglin-Index (heat sum > 10 °C from April to September) since 1961 for a set of weather stations in Austria. Colours denote Huglin categories for specific grapes. Source: Eitzinger et al. (2009c)

Geländes auf die Temperatursummen und andere klimatische Parameter, wie Windgeschwindigkeit oder Luftfeuchte, zum Ausdruck. Daneben kann es durch eine mögliche Zunahme von Extremwetterereignissen zu Schäden kommen, deren Entwicklung schwer abzuschätzen ist. Eine zunehmende Häufigkeit von Starkregenereignissen kann in Hanglagen zu einer verstärkten Erosion zwischen den Reben führen.

Über die letzten 20 Jahre zeigt sich in den mitteleuropäischen Anbaugebieten ein im Mittel 10 bis 20 Tage früherer Ablauf der phänologischen Entwicklungsphasen wie Austrieb, Blüte und Reife. Abbildung 3.8 zeigt den langjährigen Trend zeitlich früheren Lesereife und der früheren Lesetermine an unterschiedlichen Weinbaustandorten in Europa. Der Trend zu früherer Reife in Österreich wird durch steigende Zuckergehalte (zunehmendes Mostgewicht) und abnehmende Säuregehalte zum selben Messtermin sowie durch eine immer frühere Blüte bestätigt (Eitzinger et al., 2009b). Aber auch die Dauer der einzelnen Entwicklungsphasen verkürzt sich, wie zum Beispiel die Dauer der Rebblüte (Bauer, 2008; Koch, 2008).

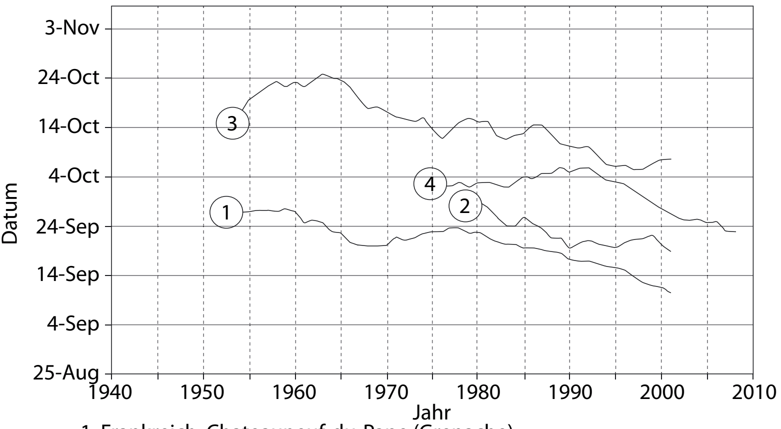
Beim Wein wirkt sich die Veränderung beim Blühtermin direkt auf das Mostgewicht der Trauben aus. Der mit steigenden Temperaturen prognostizierte frühzeitige Reifebeginn lässt zwar hohe Mostgewichte erwarten, könnte sich aber negativ auf andere qualitätsbestimmende Inhaltstoffe auswirken. Neben zu niedrigen Säurewerten können sich bei einer zu frühen Reife die subjektiven Geschmackskomponenten (durch zu hohen Alkoholgehalt, wenig Säure, höheren Gerbstoffanteil u. a.) negativ verändern, was bisher in Mitteleuropa vor allem beim Weißwein beobachtet wird.

Die Reifephase der Beeren erfolgt in einem wärmeren Klima unter höheren Temperaturbedingungen, wodurch wegen der höheren Tages- und Nachttemperaturen ein verstärkter Säureabbau (Wein- und Apfelsäure) erfolgt, was zur Ausbildung veränderter Fruchtaromen führt. Es wird wahrscheinlich zur Verschiebung des Rebsortenspektrums kommen, hin zu später reifenden Rebsorten. Eine Veränderung der Weinqualität in Richtung reiferer, extrakt- und alkoholreicherer Weine ist zu erwarten.

Die Verfrühung der Rebenphänologie bedeutet, dass die reifenden Beeren insgesamt höheren Temperaturen am Stock ausgesetzt sind. Dies führt in Kombination mit höheren Zuckergehalten und niedrigeren Säuregehalten der Beeren bei feuchten Witterungsbedingungen zu einem erhöhten Befallsdruck durch Fäulniserreger, wie Pilzbefall durch Botrytis (Botrytis wird allerdings auch stark von Erziehung, Nährstoffversorgung und Bodenpflege beeinflusst) und Grünfäule (*Penicillum* sp.) sowie andere Schaderreger, wie Essigsäurebakterien (Petgen, 2007). Zusätzlich behindert die höhere Temperatur des Leseguts eine optimale Gärung. Um diese zu gewährleisten, müssten zukünftig die Trauben in den kühleren Abend- und Nachtstunden geerntet oder vor der weiteren Verarbeitung gekühlt werden (Hoppmann, 2005).

Eine große Unbekannte ist das neue oder veränderte Auftreten von klimasensitiven Schädlingen oder Krankheiten im Weinbau. So konnte in Österreich in den letzten Jahren das Auftreten der besonders rebenschädigenden amerikanischen Rebzikade (*Scaphoideus titanus*) beobachtet werden, die als Überträger einer gefährlichen und in Österreich meldepflichtigen Rebkrankheit gilt, der Goldgelben Vergilbung (Blondes Gold) – oder auch „Flavescence dorée“ genannt (vgl. Abschnitt 3.2.10). In Slowenien hat die Goldgelbe Vergilbung, welche zu starken Blattvergilbungen führt, bereits erste Rebbestände vernichtet. Beim Traubenwickler besteht zunehmend die Gefahr der Ausbildung einer dritten Generation (wie im Burgenland schon zu beobachten; vgl. Glauninger und Kersebaum, 2009).

Ein weiteres Beispiel für den Einfluss des Klimawandels ist der kalifornische Blütenthrips. Der Schädling, der Nektarinen



1 Frankreich, Chateauneuf-du-Pape (Grenache)
2 Slowakei
3 Deutschland, Schloss Johannisberg, Rheingau (Riesling)
4 Österreich, Weinbauschule Krems, Wachau (Riesling; abgeleitet aus Blühterminen)
—— 10-Jahresmmittel

Abbildung 3.8 Trend zur früherer Lesereife und Leseterminen bei Wein in den vergangenen Dekaden an verschiedenen Standorten und bei verschiedenen Sorten in Deutschland, Frankreich, Österreich und der Slowakei. Nach: Koch (2008), in: Eitzinger et al. (2009b). Gleitendes 10-Jahresmittel des Lesetermins nach Julianischen Tagen

Figure 3.8 Trend towards earlier vintage at different sites and for different grapes in Germany, France, Austria and Slovakia (Koch, 2008, in: Eitzinger et al. 2009b). Moving 10-year average of vintage dates in Julian days

und Wein befällt und derzeit nur in Gewächshäusern überwintern kann, könnte bereits Mitte des 21. Jahrhunderts in Österreich und Süddeutschland imstande sein, im Freiland zu überwintern und in weiterer Folge Freilandkulturen schädigen. Die Temperaturerhöhung der letzten Jahre wird bei ausreichender Feuchtigkeit mit einem vermehrten Auftreten von pilzlichen und bakteriellen Krankheitserregern, nicht nur beim Wein, in Verbindung gebracht. So führte der feucht-heiße Sommer 2006 im Weinbau vielerorts zu verstärktem Befall durch Fäulniserreger wie Grünfäule (Pilz) und Essigfäule (Bakterium; vgl. Petgen, 2007). Auch andere Pilzkrankheiten werden durch Beobachtungen in der Praxis in Verbindung mit dem Klimawandel gebracht, wie Krankheiten durch holzzerstörende Pilze (ESCA, Eutypiose). Stressbedingte physiologische Krankheiten (durch Trockenheit, erhöhte Temperaturen), wie die Traubenwelke, können durch verstärkten Nährstoffsstress oder unausgeglichene Nährstoffversorgung (durch Trockenheit bedingt) zum Teil auch auf veränderte Klimabedingungen zurückgeführt werden (Fardossi, 2007). In Verbindung mit Trockenstress verschlechtert sich die Nährstoffaufnahme der Reben. Eine Folge davon kann zunehmende Traubenwelke sein (zusätzlich verstärkt bei Kaliummangel).

In kontinental geprägten Klimazonen kommt es möglicherweise zu einer Zunahme der Spätfrostgefahr durch früheren Austrieb. Die Winterfrostgefahr durch zu tiefe Wintertemperaturen (unter ca. −30 °C) könnte in den derzeit gefährdeten Anbauregionen abnehmen, ist aber schwer einzuschätzen, da zum Beispiel längere warme Perioden im Winter die Frosthärte (sortenspezifisch) herabsetzen können.

Manche Spezialprodukte, wie zum Beispiel Eiswein, werden wegen zu hoher Temperaturen im Herbst und Winter an ihren klassischen Standorten schwieriger oder seltener zu produzieren sein.

Erhöhte Starkniederschläge (intensivere Gewitterniederschläge und zunehmende Winterniederschläge) führen zu zunehmender Bodenerosionsgefahr, vor allem bei zwischen den Reihen unbedeckten Böden und in hügeligem Gelände. Dies ist vor allem dann begünstigt, wenn die Rebreihen aus Bewirtschaftungsgründen entlang der Falllinie angelegt sind. Eine mögliche regional erhöhte Wahrscheinlichkeit von Hagelereignissen birgt eine steigende Gefahr von Ernteausfällen bis hin zu Stockschäden und -verlusten.

Obstbau

Die Auswirkungen eines wärmeren Klimas auf die Phänologie gelten allgemein auch für den Obstbau, je nach den klimatischen Ansprüchen der jeweiligen Kulturart. Bei Obstkulturen sind insbesondere zunehmende Trockenheit und Bewässerungsbedürftigkeit problematisch, da Obstkulturen generell einen höheren Wasserbedarf haben sowie hitze- und trockenstressempfindlicher sind als zum Beispiel der Wein. Auch eine Zunahme der Gewittertätigkeit bzw. der Heftigkeit von Gewittern, wie es unter einem wärmeren Klima erwartet wird, könnte die Schadensgefahr, insbesondere von Hagel in den wichtigsten österreichischen Anbauregionen der Steiermark weiter steigen lassen.

In Tal- und Beckenlagen besteht regional die Zunahme der Gefahr von Spätfrostschäden bei Obstgehölzen, insbesondere während der Blüte. Zusätzlich können durch extreme Witterungsphasen Störungen im Wachstumsrhythmus eintreten. So können zum Beispiel warme Witterungsabschnitte im Winter

zu einer Frostenthärtung der Gehölze führen und damit die nachfolgende Frostschadensgefahr erhöhen (Chmielewski et al., 2007).

Im Obstbau sind viele Schädlinge, insbesondere Insekten, in ihrer Entwicklung von der Temperatur abhängig, wobei hier nur der Apfelwickler genannt sei, der große wirtschaftliche Bedeutung hat (Chmielewski et al., 2007) und der je nach Region eine zusätzliche Generation ausbilden könnte. Modellrechnungen auf der Basis von Klimaszenarien für die Bodenseeregion weisen zum Beispiel eine deutlich höhere Wahrscheinlichkeit einer zweiten Larvengeneration pro Jahr für die kommenden 50 Jahre im Vergleich zu den letzten 50 Jahren aus (Stock et al., 2005).

Auch der Befallsdruck für Apfelschorf, der zu hohen Ertragsverlusten und Qualitätseinbußen im Apfelanbau führen kann, wird in Regionen ansteigen, wo trotz der erhöhten Temperaturen mit einer noch ausreichenden Feuchte für die Entwicklung des Pilzes gerechnet werden kann (niederschlagsreichere Anbauregionen).

3.2.9 Schadorganismen an Nutzpflanzen

Der Klimawandel beeinflusst eine Vielzahl abiotischer und biotischer Faktoren, die sich direkt oder indirekt auf die Pflanzengesundheit auswirken (Blümel, 2007). Änderungen im Klima können zur Verschiebungen des Wirtspflanzenspektrums von Schaderregern führen sowie das zunehmende Auftreten neuer Schaderreger unterstützen bzw. ermöglichen (Chakraborty et al., 2000; Garret et al., 2006; Garret, 2008; MacLeod et al., 2010; Salinari et al., 2006; Scherm, 2004; Shaw, 2009), deren Einschleppung, Etablierung und Ausbreitung durch die wachsende Globalisierung des Welthandels zusätzlich begünstigt wird. Extreme Wetterereignisse wie Dürre, Hitze, Starkregen oder Hagel können durch eine Schwächung der Pflanzen eine erhöhte Anfälligkeit gegenüber Schaderregern und eine verstärkte Schadwirkung auf Wirtspflanzen bewirken. Die Synchronisation der Entwicklung von Wirtspflanzen mit dem Auftreten von Schaderregern und deren natürlichem Gegenspielern kann sich verschieben und steigende Temperaturen zu einer Zunahme des Auftretens, einer rascheren Generationsfolge, der Zunahme der Migration und der Überwinterung bei Schadarthropoden führen (siehe auch Band 2, Kapitel 2). Ein Trend zu noch wärmeren Temperaturen kann die Situation zunehmend verändern und einen signifikanten Einfluss auf die Biodiversität haben, wobei Schaderreger sich regional stärker ausbreiten oder jene mit kühleren Temperaturansprüchen zurückgedrängt werden können (Eitzinger et al., 2013).

Eine Veränderung der Bedeutung von Pflanzenkrankheiten, Schädlingen und Unkräutern aufgrund des Klimawandels (Verstärkung oder Verminderung der Schadwirkung) deutet sich bereits durch zahlreiche Beobachtungen in der Praxis an (Glauninger et al., 2010; Grausgruber et al., 2010; Huss, 2012). Siehe dazu auch Details bei einzelnen Nutzpflanzenarten.

In den vergangenen Jahren wurden neue oder schadensauffällige Organismen (Krankheiten, Schädlinge, Unkräuter) in Österreich besonders intensiv untersucht, wobei aber ein kausaler Zusammenhang der Ausbreitung oder Häufigkeit dieser Schadorganismen mit dem Klimawandel oft noch ungeklärt und Gegenstand von Vermutungen ist (Blümel, 2007; Kahrer und Formayer, 2007). Als Beispiel seider Maiswurzelbohrer (Cate et al., 2006; Grabenweger, 2007, 2009) genannt, dessen rasche Ausbreitung als neuer Schädling in Europa nicht nur auf den Klimawandel zurückzuführen ist.

Unter den Krankheiten bildeten z. B. die Phytoplasmose (zellwandfreie Bakterien, die als Parasiten in Pflanzen leben) Flavescence dorée mit ihrem Überträger, der Amerikanischen Rebzikade (Reisenzein et al., 2010; Steffek et al., 2006, 2012; Zeisner und Hausdorf, 2006, 2010), die Kraut- und Knollenfäule und die Alternaria-Dürrfleckenkrankheit bei Kartoffeln (Thenmayer et al., 2006; Glauninger et al., 2010) sowie die Viröse Gelbverzwergung bei Wintergetreide mit verschiedenen Blattlausarten als Überträgern (Jungmeier et al., 2009; Jungmeier, 2010) wichtige Arbeitsschwerpunkte. Unter den neuen Unkräutern werden gegenwärtig ca. 30 bis 40 Arten bearbeitet. Hierzu zählen u. a. einige Unkrauthirsen, die Pferdenessel, die Große Knorpelmöhre, das Drüsige Springkraut, die Giftbeere, die Ambrosie (Follak et al., 2013), die Samtpappel und die Seidenpflanze (Burger und Glauninger, 2007; Follak, 2007, 2008; Fragner, 2010; Glauninger et al., 2006; Glauninger, 2011; Huemer und Glauninger, 2010).

3.2.10 Fauna

Abgrenzung und Interaktion mit anderen Biotopelementen

In Österreich leben rund 46 000 Tierarten (Geiser, 1998). Die Zahl der jedes Jahr erstmals neu im Bundesgebiet festgestellten Arten (bisher übersehene, eingewanderte oder eingeschleppte, neu beschriebene Arten) ist unbekannt. Seit 1990 wurden beispielsweise jährlich rund sieben Tierarten neu für die Wissenschaft beschrieben (Rabitsch und Essl, 2009). Bei der Insektengruppe der Wanzen (Heteroptera) beträgt der durchschnittliche Zuwachs durch übersehene, eingewanderte

Box 3.3: FFH-Tierarten und Klimawandel
Box 3.3: Animal species in the Habitat Directive and climate change

Die Tierarten der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie (FFH-RL) sind in besonderem Maße EU-weit geschützt. In Österreich kommen rund 164 Tierarten (Anhang II, IV, V der Fauna-Flora Habitatrichtlinie; inklusive Arten der EU-Osterweiterung, aber ohne Berücksichtigung taxonomisch problematischer Fälle) der FFH-RL vor. Gezielte Untersuchungen zu den Auswirkungen eines Klimawandels auf die FFH-Tierarten in Österreich liegen nicht vor. Im letzten Bericht über den Erhaltungszustand der Arten und Lebensräume (Artikel 17 FFH-RL) wurde auf Grundlage der Angaben der einzelnen Länder jedoch angegeben, dass sich der Klimawandel besonders negativ auf Amphibien in Europa auswirken könnte (EC, 2009).

Box 3.3 Tabelle 1 Artengruppen und Anteil der durch den Klimawandel gefährdeten Arten auf Grundlage der Artikel 17-Berichte der EU-Mitgliedsländer
Box 3.3 Table 1 Species groups and percentages of species at risk under climate change according to Article 17-reports of EU Member States.

Artengruppen	Summe der Arten in dieser Gruppe	% vom Klimawandel beeinflusste Arten
Amphibien	51	45
Arthropoden	118	29
Säugetiere	125	26
Weichtiere	35	17
Reptilien	87	13
Fische	100	4

Die möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf Tierarten der Anhänge der FFH-RL sowie Interaktionen zwischen ausgewählten Arten wurden von Beierkuhnlein et al. (2012) für Europa untersucht. Beispielhaft ist hier die Interaktion zwischen der Großen Mosaikjungfer, *Aeshna viridis* und der Krebsschere (*Stratiotes aloides*). Die Grüne Mosaikjungfer ist in Mitteleuropa an Gewässer mit Vorkommen der Krebsschere gebunden, die die einzige Eiablagepflanze dieser Art darstellt. Die Modellierung der zukünftigen Verbreitung beider Arten im Klimawandel projiziert für beide Arten einen Verlust an der südlichen Verbreitungsgrenze und eine Ausbreitung nach Norden, sodass sich auch die zukünftigen Verbreitungsgebiete überlappen. Eine räumliche Desynchronisation wird von dem Modell nicht projiziert.

Aufgrund der zu erwartenden kleinräumigen regionalen Unterschiede wäre eine konkrete Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf FFH-Arten für Österreich wünschenswert. Derzeit liegen keine solchen Untersuchungen vor.

oder eingeschleppte Arten seit 1990 rund drei Arten pro Jahr (Rabitsch, 2008). Auch wenn der Wissensstand zum Inventar der europäischen Fauna gut ist, bestehen bei vielen Tiergruppen noch Lücken, insbesondere bei kleinräumig verbreiteten, endemischen Arten (Essl et al., 2012), der Kenntnisstand zu den Tierarten Österreichs ist daher sehr heterogen. Während Verbreitung und Biologie einiger Arten sehr gut bekannt sind, liegen für die Mehrzahl der Arten kaum Informationen vor. Dies gilt auch für Teile der Biodiversität mit hoher Verantwortung (siehe dazu Box 3.3). Aussagen über die Auswirkungen des Klimawandels beschränken sich daher zwangsläufig auf wenige „Modellarten oder -gruppen“, die nicht immer repräsentativ für alle Tiergruppen sein müssen, oder auf Untersuchungen aus anderen Regionen. Die grundlegenden Auswirkungen des Klimawandels auf Organismen lassen sich jedoch auf dieser Grundlage ableiten. Die Populationen können sich durch phänotypische Plastizität oder evolutionäre Selektion in Raum und Zeit anpassen: Populationsbiologie (Phänologie, Lebenszyklus) und Verhaltensökologie (Abwanderung in klimatisch geeignete Räume) stellen die wichtigsten Dimensionen möglicher Anpassungsmechanismen dar (Bellard et al., 2012). Näheres zu autonomer und geplanter Anpassung ist in Band 3 zu finden.

Der allgemeine Ansatz, zuerst Arten (bzw. Artengruppen) zu diskutieren und daran anschließend deren Verhalten im ökosystemaren Kontext zu betrachten, lässt sich bei vielen Ar-

ten der Fauna nur schwer einhalten. Einer der Hauptgründe dafür ist, dass viele Tierarten eine ganze Reihe an unterschiedlichen Vegetations- bzw. Habitattypen in ihrem Lebensraum benötigen, d. h. unterschiedliche funktionale und taxonomische Ebenen simultan berücksichtigt werden müssen. Inwiefern die aktuell beobachtbare Korrelation von Habitat und Artvorkommen eine wirkliche Habitatbindung darstellt, ist vielfach ungeklärt. Für diesen Fall sind sowohl die mögliche Veränderung des Habitats als auch die direkten Auswirkungen eines Klimawandels auf den Organismus relevant. Es werden daher in diesem Kapitel, wo nötig, simultan Artenebene und Ökosystemebene berücksichtigt.

Von besonderer Bedeutung für die Funktionalität der Lebensgemeinschaften sind Interaktionen zwischen den Arten, zum Beispiel Räuber-Beute-, Wirt-Parasit- sowie Pflanzen-Bestäuber-Beziehungen. Solche Interaktionen können auf verschiedene Weise durch den Klimawandel beeinflusst werden, z. B. durch zeitliche Desynchronisation zwischen Blühzeitpunkt und Entwicklungsstadium der Bestäuber oder durch die räumliche „Auseinanderverschiebung" der Areale von Arten (Hegland et al., 2009; Schweiger et al., 2010; Van der Putten et al., 2010).

Die Bandbreite möglicher Klimaänderungsszenarien ergibt dabei in Kombination mit der natürlichen Variabilität biologischer Prozesse ein hohes Maß an Unsicherheit in Bezug auf Klimawandelfolgen für Arten der Fauna. Dennoch lassen sich klimasensible Arten und Lebensgemeinschaften bzw. Lebensräume identifizieren, Klimawandelfolgen abschätzen und mögliche Anpassungsmaßnahmen für die Erhaltung von Ökosystemleistungen und den Naturschutz ableiten (siehe dazu auch Band 3).

In diesem Abschnitt zur Fauna werden neben Arthropoden, Amphibien und Reptilien, Fischen und Vögeln auch Nutztiere und die Auswirkungen eines Klimawandels auf deren Befinden, Produktivität und Gefährdung durch Krankheiten behandelt.

Sensitivität in Bezug auf Klimavariable

Klimatische Parameter haben die Entstehung der Fauna Österreichs in besonderem Maße geprägt. Die pleistozänen Eiszeiten haben wiederholte Wanderungen und Extinktionen von Populationen verursacht, die sich bis heute in Verbreitungsmustern und im Genpool der Arten widerspiegeln (Schmitt, 2007; Graf et al., 2007). Dies deutet eine hohe Sensitivität in Bezug auf klimatische Veränderungen an.

Auf der Artenebene relativ gut identifizierbare und auch gut dokumentierte Reaktionen auf klimatische Veränderungen sind phänologische und verhaltensbiologische Anpassungen. Zu nennen sind insbesondere veränderte Ankunfts- und Abflugzeiten sowie verkürzte Flugstrecken der Zugvögel (z. B. Dunn und Winkler, 2010). Auch veränderte Reproduktionszyklen bei ektothermen Organismen, wie das Auftreten zusätzlicher Generationen bei Insekten, sind vielfach belegt (z. B. Ott, 2008). Die Auswirkungen sind art- und situationsspezifisch verschieden und können positiv oder negativ sein: Mildere Wintertemperaturen können die Mortalitätsraten verringern (wenn Extremwerte ausfallen) oder erhöhen (wenn im Winter keine Nahrung zur Verfügung steht) und sind kontextabhängig zu untersuchen und zu bewerten.

Arealverschiebungen als Folge des rezenten Klimawandels sind bereits heute zu beobachten und verschiedene Modelle lassen für unterschiedliche Tiergruppen in Europa teilweise bedeutende Änderungen bis Ende des Jahrhunderts erwarten. Voraussetzung dafür ist jedoch die Fähigkeit der Arten in der zukünftigen Landschaftsmatrix zu wandern und sich gegenüber den in den neuen Gebieten vorkommenden Arten durchzusetzen. Araújo et al. (2006) projizierten Arealerweiterungen für Amphibien und Reptilien in Europa bei ungehinderter Ausbreitung, jedoch Arealverluste bei fehlender Ausbreitung. Settele et al. (2008) erwarten, basierend auf der Annahme fehlender Ausbreitung, bis 2050 für rund 31 % der Tagfalter Europas substanzielle Populationseinbrüche. Nach Huntley et al. (2008) könnten sich die Areale vieler europäischer Brutvögel bei einer Erwärmung um 3 °C mehrere hundert Kilometer nach Norden verschieben und zugleich um rund 20 % an Fläche verlieren. Devictor et al. (2012) konnten zeigen, dass die Geschwindigkeit der Arealverschiebungen von Vögeln und Schmetterlingen in Europa jedoch nicht mit der Geschwindigkeit der Temperaturerhöhungen mithalten kann. Maiorano et al. (2011) projizierten modellbasiert signifikante Diversitäts-Rückgänge für Säugetiere im Mediterrangebiet, trotz der Annahme ungehinderter Ausbreitung in ihren Modellen. Für Wildschweine wird hingegen eine Zunahme der Häufigkeiten sowie eine Arealerweiterung nach Norden und Nordosten in Europa prognostiziert (Melis et al. 2006). Arealverluste werden hingegen für verschiedene aquatische Arthropodengruppen in Mitteleuropa (Domisch et al., 2011) und endemische Tiergruppen in Österreich (Dirnböck et al., 2011) erwartet. In allen Modellen steigen die Verluste mit der Stärke des Klimawandels (IPCC, 2014). Eine nordwärts gerichtete Arealverschiebung führt zu einer Mediterranisierung der Fauna Europas, wie sie anhand von Libellen (Ott, 2008), Süßwasser-Makroinvertebraten (Bonada et al., 2007) und Wanzen (Rabitsch, 2008) bereits beschrieben wurde. Die Analyse klimaanaloger Räume (Gebiete, die derzeit ein Klima aufweisen,

das dem zukünftigen Klima anderer Gebiete vergleichbar ist) hat gezeigt, dass für südliche Arten die Wahrscheinlichkeit, in Zukunft in Mitteleuropa passende Umweltbedingungen vorzufinden, hoch ist (Bergmann et al., 2010). Während die nordwärts gerichtete Arealerweiterung gegenwärtig zu einer Zunahme der Artenzahlen in Mitteleuropa führt, ist in Zukunft mit einem Rückgang und Arealverlust in den südlichen Arealteilen zu rechnen. Dasselbe gilt für Arealgewinne und -verluste in entsprechenden Höhenlagen. Die zukünftigen Auswirkungen auf aktuelle Vergesellschaftungen, die Entstehung neuer Artengemeinschaften und Interaktionen zwischen den Arten sind jedoch großteils unbekannt. Entsprechende Vorsicht ist daher bei der Interpretation von modellbasierten Sensitivitäts- und Impaktstudien geboten.

Vereinfachende Aussagen hinsichtlich der „Gewinner und Verlierer" des Klimawandels gehen oftmals auf die ökologischen Eigenschaften der Arten zurück. In vielen Biotopen lebensfähige, opportunistische und anpassungsfähige Arten werden eher profitieren, als stenöke, spezialisierte Arten mit kleinen Arealen. Xerothermophile oder hoch mobile Arten haben vermutlich Vorteile gegenüber hydro- oder hygrophilen Arten mit geringem Ausbreitungspotenzial (Ott, 2008; Rabitsch et al., 2010). Besonders vom Klimawandel betroffene Lebensraumtypen – und in der Folge deren Zönosen – sind jene mit langer Entwicklungsdauer, wie Moore, altholzreiche Wälder, Lebensräume oberhalb der Waldgrenze, wie alpine Rasen und Schneebodengesellschaften, Gebirgsseen und Fließgewässer-Oberläufe, sowie kleinflächige Lebensräume mit stabilen Umweltbedingungen (z. B. Quellen). Der Klimawandel stellt somit eine Bedrohung, aber auch ein „window of opportunity" für Arten dar und es ist kaum möglich, exakt vorherzusagen, welche Arten in der Lage sein werden, die (für sie) verbesserten Umweltbedingungen zu nutzen und welche nicht.

Inwieweit sich die Zunahme klimatischer Extremereignisse auf die Tierwelt auswirken wird, ist – auch wegen der Unregelmäßigkeit der Ereignisse – noch ungenügend bekannt. Eine Förderung biologischer Invasionen wird vermutet, u. a. durch die Herabsetzung der Widerstandsfähigkeit („*biotic resistance*") natürlich angepasster Artengemeinschaften gegenüber eingeschleppten, gebietsfremden Arten (Diez et al., 2012). Der Klimawandel kann gebietsfremde Arten begünstigen, die bislang nicht in der Lage waren sich selbständig in der freien Natur zu vermehren (z. B. Arten in Glashäusern, wie der Kalifornische Blütenthrips *Frankliniella occidentalis*, vgl. Kahrer und Formayer, 2006), deren Bestände durch regelmäßige kalte Winter reguliert wurden (z. B. Nutria *Myocastor coypu*, vgl. Doncaster und Micol, 1990) oder deren Reproduktion direkt von der Temperatur abhängt (z. B. die Rotwangen-Schmuckschildkröte *Trachemys scripta elegans*, vgl. Ficetola et al., 2009; vgl. auch die Übersicht bei Rabitsch und Essl, 2010). Die Entkopplung von Wirt-Parasitoid-Interaktionen ist möglich und kann das Risiko einer Zunahme von Schadinsekten erhöhen (Hance et al., 2007). Extremereignisse sind schwierig vorherzusagende Stressfaktoren, die jedoch, wenn sie in Kombination mit anderen Faktoren wirken, das Vorkommen und die Verbreitung von Arten wesentlich beeinflussen können (Jentsch et al., 2007).

Der anthropogene Klimawandel wirkt nicht in Isolation auf die Umwelt. Eine Vielzahl weiterer Faktoren, wie die Zerstörung und Degradation natürlicher und naturnaher Lebensräume durch intensive Landnutzung, infrastrukturelle Maßnahmen sowie die daraus folgende Fragmentierung und zunehmende Isolation geeigneter Habitate und neue Konkurrenzverhältnisse durch absichtlich oder unabsichtlich ausgebrachte gebietsfremde Arten bedrängen die biologische Vielfalt (MEA, 2005; Brook et al., 2008; Walther et al., 2009; IPCC, 2014).

Die zahlreichen, auf Rasterdaten mit geringer räumlicher Auflösung beruhenden, modellbasierten Analysen liefern zwar vereinfachte Anhaltspunkte, die realen Bedingungen sind jedoch wesentlich komplexer und kleinräumlich kaum vorhersagbar. Mikroklimatische Gegebenheiten, insbesondere in orographisch reich strukturierten Regionen in Österreich, wirken als Puffer gegenüber makroklimatischen Veränderungen. Synökologische Faktoren (Konkurrenz, Mobilität, Populationsdynamik) beeinflussen Ausbreitungsvorgänge in grundlegender Weise, sodass rein statische Analysen, die diese Faktoren nicht berücksichtigen, nur aus theoretischer Sicht interessant sind (vgl. Abschnitt 3.1.2). Die Komplexität der Vorgänge erzwingt zwar eine Vereinfachung und kann zumindest teilweise in aufwendigen, prozessbasierten Modellen (Kühn et al., 2009) oder in der Kombination verschiedener Methoden (Dawson et al., 2011) berücksichtigt werden, die Grenzen der Gültigkeit der Interpretationen sollten jedoch immer deutlich gemacht werden.

Neben beobachtbaren Änderungen der Areale oder der Phänologie der Arten, geschehen eine Reihe von weniger offensichtlichen, oft nur durch spezielle Methoden nachweisbare Änderungen, die langfristig die mögliche Anpassung und damit die Auswirkungen des Klimawandels wesentlich beeinflussen werden. Keine Art (mit wenigen Ausnahmen) besteht aus genetisch homogenen Populationen. Mit dem Arealverlust lokaler Populationen gehen somit auch bestimmte genetische Informationen verloren, d. h. der Verlust an genetischer Vielfalt ist höher als der Verlust an Artenvielfalt (Abbildung 3.9). Habel et al. (2010) haben diesen Effekt für den Blauschillern-

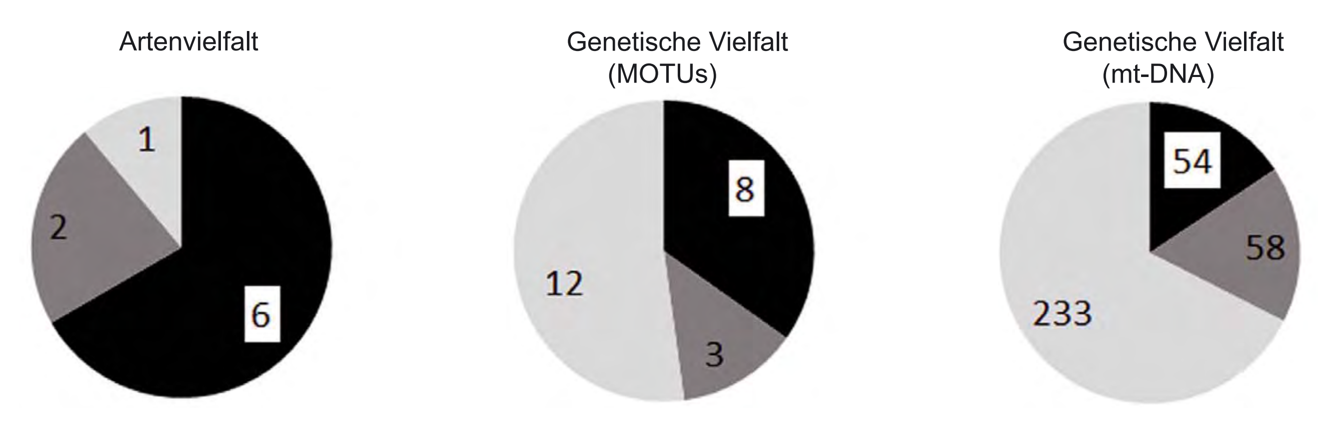


Abbildung 3.9 Unterschiedliche Verlustraten auf verschiedenen Ebenen der Biodiversität: Keine Änderung durch Klimawandel (schwarz), Verlust bei anhaltendem Klimawandel (dunkelgrau; IPCC-Szenario A2a, +2,0 bis +5,4 °C), Verlust bei moderatem Klimawandel (hellgrau; IPCC-Szenario B2a, +1,4 bis +3,8 °C). Die Projektionen beruhen auf den Durchschnitten der Klimamodelle CSIRO, HadCM3, CCCMA für das Zieljahr 2080. Untersucht wurden sieben Köcherfliegen, eine Eintagsfliege und eine Steinfliege aus montanen Lebensräumen in Europa. Während die Artenvielfalt bei beiden Szenarien zu zwei Dritteln unverändert bleibt, gilt dies nur für rund ein Drittel der MOTUs (Molecular operational taxonomic units) und weniger als ein Viertel der Mitochondrien-DNA Haplotypen (Bálint et al., 2011)

Figure 3.9 Different loss rates at various levels of biodiversity. Black = no loss due to climate change; dark gray = loss in climate change scenario A2a (between +2.0 and +5.4 °C warming); light gray = loss in climate change scenario B2a (+1.4 up to +3.8 °C increase in temperature). Projections are mean values from the climate models CSIRO, HadCM3, CCCMA for the year 2080. Seven Trichoptera, and one Ephemeroptera and Plecoptera species were analysed. While species diversity remained unchanged (in blue) for about two thirds in both scenarios, in MOTUs (molecular operational taxonomic units) just one third, and in mt-DNA haplotypes even less remained unchanged (Bálint et al., 2011)

den Feuerfalter *Lycaena helle* in Westeuropa im Klimawandel projiziert, Bálint et al. (2011) konnten einen solchen Verlust für mehrere montane aquatische Insektenarten nachweisen. Dieser mögliche Verlust kryptischer (versteckter) evolutionärer Linien wurde bislang noch kaum untersucht, ist jedoch für die Strategien und Optionen des Naturschutzes von hoher Bedeutung.

Arthropoden

Abgrenzung und Charakterisierung

Arthropoden stellen die mit Abstand artenreichste Tiergruppe in Österreich dar. Rund 85 % der in Österreich vorkommenden Tierarten sind Spinnentiere, Tausendfüßer, Insekten und Krebstiere (Geiser, 1998). Arthropoden leben in allen terrestrischen und aquatischen Lebensräumen und besitzen die unterschiedlichsten Ernährungsgewohnheiten. Sie besitzen in vielen Ökosystemen Schlüsselfunktionen als Räuber (inkl. Parasiten) oder Beute, Destruenten oder Bestäuber und sind mitunter von großer wirtschaftlicher Bedeutung.

Sensitivität in Bezug auf Klimavariablen und Klimawandelfolgen in Österreich

Während die Kenntnis zu Biologie und Verbreitung bei einigen Gruppen als sehr gut bezeichnet werden kann, ist über viele Arten sehr wenig bekannt. Dies gilt auch für die möglichen Auswirkungen des Klimawandels. Dokumentiert sind vor allem Änderungen der Areale und der Phänologie, wenngleich nur selten Langzeitdatenreihen aus standardisierten Erhebungen vorliegen. Medienwirksam aufbereitete „Signale“ des Klimawandels, wie die Ausbreitung des Ammen-Dornfingers (*Cheiracanthium punctorium*) oder von Sandfliegen (*Phlebotominae*) halten bei genauerer Analyse nicht immer einer kritischen Analyse stand und lassen sich zumindest teilweise durch andere Faktoren erklären (Muster et al., 2008; Naucke et al., 2011). Es liegen aber auch eine Reihe gut dokumentierter Fälle vor, wobei die Ausbreitung bei mobilen Arten sehr schnell ablaufen kann. Dies belegen beispielsweise die rasche Besiedlung Mitteleuropas durch die Feuerlibelle (*Crocothemis erythraea*) und die Wespenspinne (*Argiope bruennichii*) in den 1990er-Jahren (Ott, 2008, 2010; Kumschick et al., 2011) und die aktuell rasante Ausbreitung der Efeu-Seidenbiene (*Colletes hederae*), die möglicherweise mit den verringerten Frostschäden des Efeus zusammenhängt, dessen Pollen als Larvennahrung dient (Frommer, 2010, siehe dazu Box 3.4). Da neben

der Ausbreitungsfähigkeit auch die entsprechenden Habitate im neuen Areal verfügbar sein müssen, ist die Ursache einer rasanten Ausbreitung aber oft nicht eindeutig, sondern multifaktoriell zu begründen. Eine entsprechende zusammenfassende Auswertung mit österreichischen Daten steht noch aus.

Prognosen über zukünftige Entwicklungen auf Basis von Modellen sind aufgrund der beschränkten Datenlage nur für wenige Gruppen (vor allem Tagfalter, Libellen) möglich. Für Arten in aquatischen Lebensräumen spielt neben der lückenhaften Kenntnis der Verbreitung auch die Frage der Übertragbarkeit terrestrischer Umwelt- und Klimadaten eine wichtige Rolle.

Der „Klima-Risiko-Atlas" der Tagfalter Europas von Settele et al. (2008) zeigt deutliche Verschiebungen klimatisch geeigneter Gebiete für viele europäische Arten nach Norden. Der grobe Maßstab von 50×50 km^2 erlaubt jedoch keine detaillierten Aussagen über kleinräumige Anpassungsoptionen, insbesondere in orographisch reich strukturierten Landschaften wie Österreich. Es ist anzunehmen, dass hier eine größere Vielfalt an Klein-Habitaten zur Verfügung steht, wodurch Abwanderungen und schließlich das lokale Aussterben von Populationen verzögert werden. Bei Tagfaltern sind aktuell Arealverschiebungen und Änderungen der Höhenverbreitung zu beobachten und z. B. im Schweizer Biodiversitätsmonitoring dokumentiert (Vittoz et al., 2010). Wie bereits oben festgestellt, ist jedoch einschränkend festzuhalten, dass für viele Arten die tatsächliche Ausbreitungsfähigkeit nicht bekannt ist und kleinräumig verbreitete Arten (z. B. alpine Tagfalter oder Moor-Spezialisten) sich einer Modellierung aufgrund der Datenlage entziehen.

Taubmann et al. (2011) projizierten deutliche Arealverluste für die boreo-alpin verbreitete Eintagsfliege *Ameletus inopinatus* in Europa. In Kombination mit genetischen Daten wurden von den Autoren Regionen (überwiegend in Ost-Europa) identifiziert, die eine hohe genetische Vielfalt und geeignete Klimaräume im Klimawandel vereinen und daher aus Sicht des Naturschutzes besondere Aufmerksamkeit erfahren sollten. Isolierte inneralpine Vorkommen in Österreich (Andertal-Moor, Kärnten) besitzen ebenfalls eine große genetische Vielfalt, die eine Anpassung an den Klimawandel erlaubt und als Ausgangspopulation für eine zukünftige Besiedlung klimatisch geeigneter Räume in den Zentralalpen dienen könnte.

Untersuchungen zu veränderten Flugzeiten und phänologischen Änderungen verschiedener Tiergruppen liegen für zahlreiche Länder Europas vor (Essl und Rabitsch, 2013). Eine gruppenspezifische oder übergreifende Auswertung innerhalb der Arthropoden Österreichs gibt es bisher jedoch nicht.

Bei wirtschaftlich relevanten Arthropoden (z. B. Schadinsekten in der Land- und Forstwirtschaft) können klimawandelbedingte Veränderungen in der Populationsdynamik bzw. Habitatveränderungen zu erhöhten Ertragsverlusten und Bekämpfungs- bzw. Kontrollaufwand führen. Besonders gut untersucht sind Borkenkäfer (Scolytidae) und die Auswirkungen des Klimawandels auf ihre Phänologie und Areale (siehe dazu Box 3.5). Borkenkäferkalamitäten in Waldbaumpopulationen sind in wärmerem Klima häufiger, da ein entsprechendes Temperaturregime den wechselwarmen Insekten eine Massenvermehrung ermöglicht (Netherer und Schopf, 2010; Seidl et al., 2009). Eine Erhöhung der Temperatur innerhalb artspezifischer Grenzwerte steigert die Entwicklungsgeschwindigkeit, was unter anderem eine verringerte Exposition empfindlicher Entwicklungsstadien gegenüber natürlichen Gegenspielern mit sich bringt. Plastische Arten können darüber hinaus die Zahl der Generationen pro Jahr erhöhen. Das häufigere oder seltenere Über- oder Unterschreiten letaler Temperaturgrenzwerte wird sich auf die Mortalität auswirken (Moore und Allard, 2008; Netherer und Schopf, 2010). Letzteres wird vor allem an den derzeitigen Verbreitungsgrenzen wichtig sein (z. B. Jepsen et al., 2008; Bentz et al., 2010) und sich besonders bei Arten oder Stadien mit geringer Frosthärte oder bei winteraktiven Insekten auswirken (Netherer und Schopf, 2010). Diese können im Falle von zunehmenden Wintertemperaturen mit einer Ausweitung ihres Verbreitungsgebietes reagieren, wie es etwa für den Pinienprozessionsspinner sehr gut dokumentiert ist (Battisti et al., 2005; Robinet et al., 2007). An der Südgrenze oder am unteren Verbreitungsrand können letale hohe Temperaturen eine analoge Rolle spielen (Rouault et al., 2006).

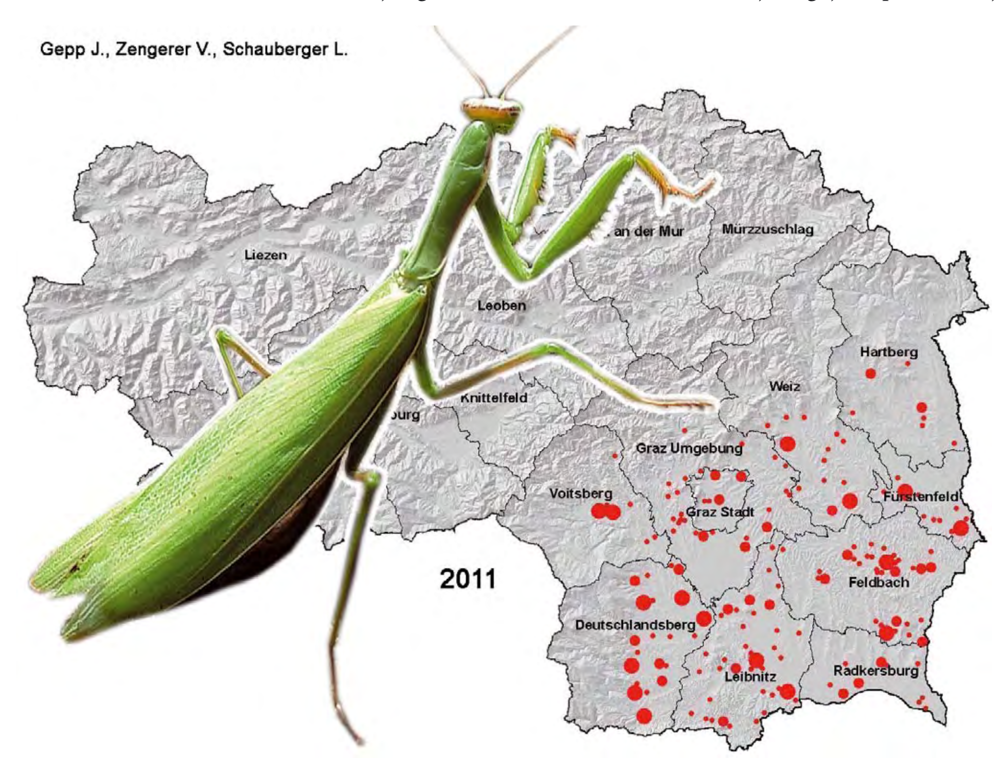
Auf herbivore Insekten kann eine Klimaänderung auch indirekt wirken, etwa über verringerte Abwehrfähigkeit von Bäumen gegen Borkenkäfer nach Trockenheit oder über eine Änderung der Nahrungseignung von Nadeln und Blättern, die positiv oder negativ ausfallen kann (Rouault et al., 2006; Netherer und Schopf, 2010; Bentz et al., 2010). Temperaturänderungen können auch zu einer Störung der Synchronisation von Insekten und ihren Wirtspflanzen führen (Baltensweiler, 1993). Co-evolvierte Wechselbeziehungen werden gestört: es kann das Insekt, die Pflanze oder keiner von beiden davon profitieren.

Generell bestehen noch beachtliche Wissenslücken über die spezifische Bedeutung der Temperatur bei vielen Insekten, auch bei vermeintlich gut untersuchten Schädlingen (Netherer und Schopf, 2010). Über die Auswirkung sich ändernder Niederschlagsmuster liegen überhaupt nur sehr fragmentarische Informationen vor (Moore und Allard, 2008). Beispielsweise

Box 3.4: Nördlicher, höher, häufiger! Arealausweitung ausgewählter Insektenarten in der Steiermark

Box 3.3: Northwards, upwards, more frequent! Area expansion of selected insect species in Styria

Am Südostrand der Alpen, speziell im Steirischen Hügelland, sind die Jahresmittelwerte seit der Jahrtausendwende flächig um rund 1 °C gestiegen, lokal um bis zu 3 °C. Die Gottesanbeterin (*Mantis religiosa*) war seit 1950 für zumindest drei Jahrzehnte im Beobachtungsgebiet eine Rarität. Heute besiedelt sie das gesamte Ost- und Weststeirische Hügelland mit lokal stabilen Populationen. Durch Zeitungsumfragen konnten tausende Einzelmeldungen mit den Witterungsdaten vergleichend dargestellt werden. Demnach kommt die Gottesanbeterin in überdurchschnittlich trockenwarmen Jahren deutlich häufiger vor als in Normaljahren und besiedelt über die warme Hangstufe ansteigend sonnenexponierte Wiesenhänge bis in 1 200 m Seehöhe. Demgegenüber reduzieren durchschnittliche und kühle Sommer ihre Häufigkeit und drängen sie wiederum auf eine Höhenverbreitung zwischen 400 und 800 m zurück. Wesentliche Einflussgrößen der Jahreshäufigkeiten sind Spätfröste, die früh schlüpfende Larven reduzieren, aber auch längere Regenperioden während des Sommers. Demnach konnte *Mantis religiosa* in den letzten 25 Jahren vom Süden kommend 20–30 km in Richtung Grazer Bergland, also in alpine Regionen und sporadisch sogar über 50 km weit in Richtung Zentrum der Ostalpen vordringen. Ähnliche Ausbreitungstendenzen zeigten unter anderen Prämissen in den vergangenen drei Jahrzehnten die Zebraspinne (*Argiope bruennichi*) sowie der vor 180 Jahren eingebürgerte Japanische Seidenspinner (*Antherea yamamai*). Frühere Raritäten wie der Steirische Fanghaft (*Mantispa styriaca*) oder der Schmetterlingshaft (*Libelloides macaronius*) sowie der Osterluzeifalter (*Zerynthia polyxena*) weiteten ihre Areale ebenfalls in Richtung Norden aus und gewannen an Höhe – aber vor allem wurden sie deutlich häufiger. Die vom Buchdrucker (*Ips typographus*) bekannte Steigerung der Generationenzahl ist von mehreren waldbewohnenden Neuropterenarten nachgewiesen und lokal auch von der Orientalischen Mauerwespe (*Sceliphron curvatum*, früher eine, jetzt mitunter zwei Generationen) sowie von der Gefleckten Ameisenjungfer (*Euroleon nostras*, früher zweijährig, jetzt partiell einjährig belegt).



Box 3.4 Abbildung 1 Verbreitung der Gottesanbeterin (*Mantis religiosa*) 2011 in der Steiermark, nach Daten einer Zeitungsumfrage. Autor: Johannes Gepp

Box 3.4 Figure 1 Distribution of praying mantis (*Mantis religiosa*) in Styria, Austria. Based on data from a survey in regional newspapers. Author: Johannes Gepp

Box 3.5: Borkenkäfer-Phänologie: Beobachtungen und Modelle
Box 3.5: Bark beetle phenology: Observations and models

Borkenkäfer sind ein natürlicher und unverzichtbarer Bestandteil im Stoffkreislauf von Waldbiozönosen. Sie besiedeln meist sekundär bereits stark geschwächte Baumindividuen. Nur wenige Arten haben das Potential, im Zuge von Massenvermehrungen vitale Bäume zu befallen, somit das Gleichgewicht von Waldbeständen zu stören und in Folge Sukzessionsprozesse zu initiieren. Als prominentester biotischer Störungsfaktor fichtendominierter Wälder Mitteleuropas gab der Buchdrucker (*Ips typographus*) in den vergangenen 20 Jahren den Anstoß für eine großflächige Verjüngung der Fichtenbestände im Nationalpark Bayerischer Wald (Heurich und Rall, 2006). Für Wirtschaftswälder stellen Gradationen ein immenses Gefährdungspotential dar. In Österreich dokumentierte das BFW 11,7 Mio. Erntefestmeter Käferholz für den Zeitraum 1991 bis 2000, bzw. 20,5 Mio. in den Jahren 2001 bis 2010. Dies bedeutet, dass 10–15 % des Einschlags im genannten Zeitraum Borkenkäferkalamitäten als Auslöser hatten. Auslöser der Gradationen waren zumeist Sturmschadensereignisse (z. B. Vivian und Wiebke im Jahr 1990 oder Kyrill im Jahr 2007), in deren Zuge ein großes Angebot an bruttauglichem Holz bereitlag, gefolgt von günstigen Temperaturen für die Käferentwicklung.

Die unmittelbare Abhängigkeit der Phänologie von den mikroklimatischen Umgebungsbedingungen ermöglicht eine genaue Abschätzung des Schwärmbeginns, der Entwicklungsrate und der potentiellen Generationsanzahl des Buchdruckers. Entwicklungsmodelle wie PHENIPS (Baier et al., 2007) prognostizieren eine Häufung von drei Filialgenerationen in den Tieflagen Mitteleuropas bzw. von zwei Generationen auf Gebirgsstandorten (Krenn, 2007), im Falle steigender Frühjahrs- und Sommertemperaturen bis in die zweite Hälfte dieses Jahrhunderts (Hlásny und Turcáni, 2008). Kleinräumige Untersuchungen stellten jedoch keinen direkten oder zeitlich verzögert wirkenden Zusammenhang zwischen Temperaturbedingungen und der Neubefallsrate von Bäumen fest. Inwieweit die prognostizierte Temperaturzunahme die vorherrschende univoltine Entwicklung des Buchdruckers im alpinen Raum wirklich beeinflusst, bedarf daher weiterer Untersuchungen (Schopf et al., 2012). Für den Norden Europas wird eine Verschiebung von primär univoltiner auf bivoltine Populationsentwicklung als sehr wahrscheinlich erachtet (Lange et al., 2006; Jönsson und Bärring, 2011). Das erhöhte Vermehrungspotential von Borkenkäfern trifft auf Nadelwaldbestände, die zunehmend durch Trockenheitsperioden und Extremtemperaturen geschwächt und damit auch gegenüber sekundären Arten disponiert sind. So treten im südalpinen Raum in den letzten Jahren verstärkt Massenvermehrungen des Sechszähnigen Kiefernborkenkäfers (*Ips acuminatus*) auf (Colombari et al., 2012).

wird bei Borkenkäferarten die Reaktion auf Klimaänderungen durch einen „hohen Grad an Komplexität und Unsicherheit“ (Bentz et al., 2010) gekennzeichnet sein. Es muss davon ausgegangen werden, dass es durch Klimaänderungen zu Arealverschiebungen oder Ausweitungen der Zonen mit Massenvermehrungen forstschädlicher Insekten kommt. Neue Assoziationen mit bislang nicht betroffenen Wirtspflanzen sind eine mögliche Folge (Netherer und Schopf, 2010; Bentz et al., 2010). Zusätzlich werden invasive gebietsfremde Arten (Neozoen) zunehmende Bedeutung erlangen (Rabitsch, 2010). Es ist zu erwarten, dass Klimaänderungen expansive Schädlingsarten begünstigen werden. Die erfolgreiche Bekämpfung des Asiatischen Laubholzbockkäfers (*Anoplophora glabripennis*) in Braunau / Oberösterreich hat rund 2 Mio. Euro gekostet, aber dadurch forstwirtschaftliche und ökologische Schäden viel höheren Ausmaßes vermieden.

Diese Insekten sind meist plastischer in ihrer Lebensweise und von breiterer ökologischer Amplitude, so dass sie unter sich wandelnden Umweltbedingungen den angepassten, spezialisierten Arten konkurrenzüberlegen sein werden (Rabitsch, 2010). Mit zunehmendem internationalem Handel erhöht sich das Risiko für die Einschleppung neuer Arten, graduelle Änderungen der Klimabedingungen können die Möglichkeiten zur Etablierung auch in vormals ungeeigneten Gebieten bringen. Verstärkt werden können negative Auswirkungen von wirtschaftlich bedeutsamen Arten durch mögliche Entkopplungen bestehender Interaktionen mit Parasiten und Pathogenen (z. B. Hance et al., 2007). Siehe dazu auch „Störungsregime“ in Abschnitt 3.3.4.

Manche Schadinsekten im Intensivgrünland werden durch wärmeres Klima begünstigt, z. B. die Wurzeln fressenden Larven verschiedener Blatthornkäfer, wie Feldmaikäfer (*Me-*

lolontha melolontha) und Junikäfer (*Amphimallon solstitiale*), oder auch manche Kurzfühlerheuschrecken, die kurzfristige Massenvermehrungen durchlaufen könnten (Eitzinger et al., 2009c). Auch für human- und veterinärgesundheitlich relevante Arthropoden sind Änderungen der Vorkommen zu erwarten. In Süd- und Westeuropa haben z. B. Prozessionsspinner an Häufigkeit zugenommen und ihr Areal erweitert (Netherer und Schopf, 2010). Es ist insgesamt damit zu rechnen, dass sich das Spektrum an medizinisch relevanten Arten in Mitteleuropa ändern wird (Aspöck, 2007).

Es ist zu erwarten, dass die komplexen ökologischen Beziehungen zwischen Arten, wie Herbivorie, Prädation, Bestäubung, Parasitismus und Konkurrenz, durch den Klimawandel beeinflusst werden. Ein Beispiel ist die projizierte räumliche Entkopplung des Natternwurz-Perlmutterfalters (*Boloria titania*) und seiner Hauptnahrungspflanze, dem Schlangen-Knöterich (*Polygonum bistorta*, vgl. Schweiger et al., 2008). Modellberechnungen zeigen, dass es bis 2080 zu einer Verlagerung der klimatisch günstigen Gebiete des Falters in den Norden kommt, während der potenzielle Klimaraum der Pflanze stark reduziert wird. Das hat zur Folge, dass Klimagebiete, in denen beide Arten gemeinsam vorkommen, stark eingeschränkt werden. Selbstverständlich reagieren nicht alle Arten in derselben Weise, wodurch Prognosen weiter erschwert werden (Pöyry et al., 2009). Nach Schweiger et al. (2011) ist nicht die Arealgröße oder Nischenbreite von Faltern für eine mögliche Entkopplung entscheidend, sondern die Arealgröße der Futterpflanzen. Modellierungen der potenziellen Arealveränderung einzelner Arten der Wildbienengattung *Colletes* in Europa zeigten für Generalisten und für Spezialisten Arealverluste und erhöhte Isolation zwischen geeigneten Klimaräumen (Roberts et al., 2011). Auch bei aquatischen Arten deuten Klimamodelle eine Arealverschiebung in höhere Bereiche an, aufgrund der Mikrohabitat-Einnischung, insbesondere die Bindung an spezifische Substrate, ist jedoch mit Populationseinbußen durch fehlende Mikrohabitatverfügbarkeit zu rechnen. Hinzu kommt, dass viele aquatische Insektenendemiten (vor allem Plecoptera und Trichoptera) am Südwest-, Süd- bzw. Südostrand der Alpen aufgrund der geringen Höhe der Gebirge kaum Möglichkeiten haben, bei einer Temperaturerhöhung in höhere, kühlere Lagen auszuweichen (siehe dazu Box 3.6).

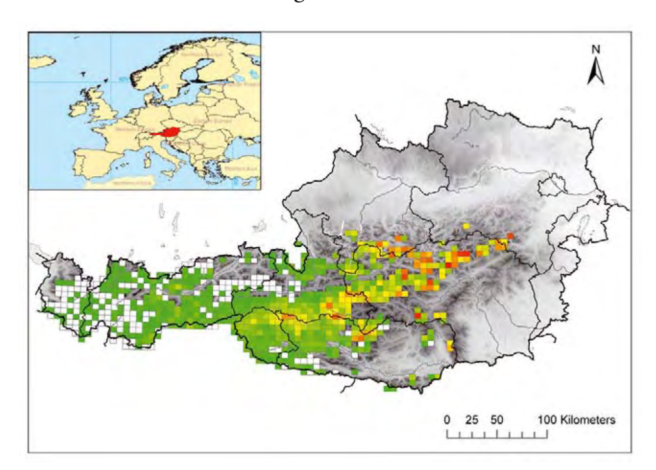
Durch den zunehmenden globalen Waren- und Güterverkehr, insbesondere durch den Zierpflanzenhandel und Holzimporte, gelangt eine steigende Zahl an gebietsfremden Arthropoden nach Mitteleuropa, von denen einige in der Lage sein werden, von einem geänderten Klima zu profitieren. Darunter sind wirtschaftlich relevante Arten, wie z. B. die Amerikanische Rebzikade (*Scaphoideus titanus*). Diese aus Nordamerika eingeschleppte Kleinzikade überträgt Phytoplasmen, die bei Weinstöcken die Vergilbungskrankheit „Flavescence dorée“ verursachen. Die Zikade hat sich in den letzten Jahren von Slowenien her in die Südoststeiermark (Zeisner, 2006) und weiter in das Süd- bzw. Mittelburgenland ausgebreitet. Mit einer weiteren Ausbreitung ist zu rechnen (Steffek et al., 2007). Eine Studie zur Auswirkung einer durchschnittlichen Temperaturerhöhung um 2,8 °C auf die Verbreitung zeigte indes, dass sich die Zikade im Norden besser etablieren könnte, im Süden jedoch durch Hitze- und Trockenstress limitiert wäre, wodurch es zu einer Verschiebung ihrer südlichen Verbreitungsgrenze kommen würde (Strauss et al., 2012).

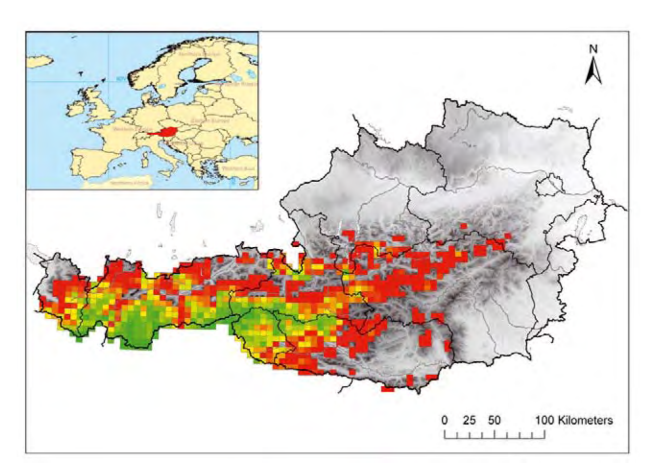
Neben den unabsichtlich durch den Menschen eingeschleppten invasiven Arten sind auch Pflanzenschädlinge aus Südeuropa von Bedeutung, welche ihr Areal ohne menschliche Hilfe nach Norden ausdehnen, sobald das Klima es zulässt: Hierbei hat sich gezeigt, dass dieser Vorgang stufenweise vor sich geht. Zunächst ermöglichen mildere Winter einen ausreichenden Überwinterungserfolg einzelner bisher nur weiter südlich auftretender Arten. Eine erfolgreiche Überwinterung allein führt jedoch nicht notwendigerweise zu Schäden für die Landwirtschaft, da in diesem Stadium noch mit keinem Massenauftreten gerechnet werden muss. Erst bei entsprechend hohen Sommertemperaturen sind südliche Arten infolge ihrer hohen Temperaturansprüche in der Lage, sich ausreichend fortzupflanzen und dann auch in Österreich eine Massenvermehrung zu verursachen. Offenbar findet die Baumwollkapseleule (*Helicoverpa armigera*) derzeit solche Bedingungen vor. Nur in den besonders heißen Sommermonaten der Jahre 2003 und 2012 wurden ihre Raupen an Mais, Tabak, Paradeiser, Paprika, Fisolen und verschiedensten Blumen schädlich. Dies hängt offenbar hauptsächlich mit den in diesen Jahren herrschenden tropischen Sommertemperaturen zusammen und weniger mit den milderen Wintermonaten. Dieser Zusammenhang bietet eine gute Erklärung dafür, dass die Puppen der Baumwollkapseleule nicht nur in ihrem normalen Fluggebiet im Flachland (Andau, Seewinkel, 300 m Seehöhe), sondern auch in Mittelgebirgslagen (Mönichkirchen, 1 000 m Seehöhe) im Experiment gut überwintern konnten (Kahrer et al., 2012), obwohl sie dort nicht vorkommen oder zumindest nicht schädlich werden.

Besonderes Augenmerk wird in Zukunft auch auf Gewächshausschädlinge (z. B. *Frankliniella occidentalis*, *Trialeurodes vaporariorum, Liriomyza huidobrensis, Tuta absoluta*) oder Vorratsschädlinge zu lenken sein, die in Österreich bereits vorhanden sind und bei fortschreitender Klimaänderung zunächst im Freien überwintern und sich später massenhaft vermehren könnten (Kahrer und Formayer, 2006).

Box 3.6: Endemiten und Klimawandel
Box 3.6: Endemics and climate change

Endemiten sind Arten oder andere taxonomische Einheiten, die nur in einem eingeschränkten Gebiet vorkommen. In Österreich kommen 748 (sub)endemische Tier- und Pflanzenarten vor (1,2 % der Gesamtbiodiversität), der Großteil davon in den nicht eiszeitlich vergletscherten, randlichen Refugialgebieten der Ost- und Südalpen (Rabitsch und Essl, 2009). Viele Endemiten besitzen geringe Populationsgrößen, haben eine geringe Ausbreitungsfähigkeit und sind ökologisch anspruchsvoll. Dadurch besteht für sie bei veränderten Umweltbedingungen ein erhöhtes Aussterberisiko als Folge stochastischer Zufallsereignisse, fehlender Migrationskapazität und geringem Anpassungspotenzial. In einer Studie, welche die österreichischen Endemiten alpiner Lebensräume aus fünf Tier- und einer Pflanzengruppe (Schmetterlinge, Spinnen und Weberknechte, Laufkäfer, Schnecken, Gefäßpflanzen) umfasste, wurden diese Risiken quantifiziert (Dirnböck et al., 2011). Mit einem Modell wurde die potenziell mögliche Verschiebung der Waldgrenze bei verschiedenen Klimawandelszenarien simuliert. Es zeigte sich, dass jene Gebiete, in denen die meisten Endemiten vorkommen, den stärksten Verlust waldfreier, alpiner Flächen erleiden werden. Schon unter dem schwächsten Klimawandelszenario (+1,8 °C bis zum Jahr 2100) gehen der Modellanalyse nach 77 % dieser Gebiete verloren. Bei einem stärkeren Temperaturanstieg (+4 °C bis zum Jahr 2100) würden kaum alpine Flächen in diesen Gebieten übrig bleiben. Die weltweit nur in den Alpen vorkommenden endemischen Arten sind als einzigartiger Beitrag zur globalen Biodiversität für den Naturschutz von besonderer Bedeutung und einem besonders hohen Aussterberisiko ausgesetzt.





Box 3.6 Abbildung 1A Endemiten-Vielfalt in den österreichischen Alpen: Summe endemischer Gefäßpflanzen, Schmetterlinge, Spinnen und Weberknechte, Laufkäfer und Schnecken, zunehmend von grün über gelb nach rot; weiße Rasterzellen kennzeichnen Gebiete ohne Endemiten. Verändert nach Dirnböck et al. (2011)

Box 3.6 Figure 1A Diversity of endemic species in the Austrian Alps: sum of endemic vascular plants, butterflies, spiders, beetles and snails (increasing diversity from green to red; white grid cells represent areas without endemic species). Modified after Dirnböck et al. (2011)

Box 3.6 Abbildung 1B Relativer Verlust alpiner, waldfreier Habitate bei angenommenen +1,8 °C Erwärmung im Jahr 2100 (zunehmender Verlust von grün über gelb nach rot). Verändert nach Dirnböck et al. (2011)

Box 3.6 Figure 1B Relative loss of alpine, non-forested habitats under a +1.8 °C warming scenario in 2100 (increasing loss from green to red). Modified after Dirnböck et al. (2011)

Amphibien und Reptilien

Abgrenzung und Charakterisierung

Für Österreich sind derzeit 21 Amphibien- und 14 Reptilienarten bekannt. Ihre Verbreitung ist gut dokumentiert und es liegen zahlreiche Arbeiten zur Populationsbiologie und zur Gefährdung vor (Cabela et al., 2001; Gollmann, 2007). Hinzu kommen einige absichtlich ausgesetzte Arten und Unterarten, darunter südeuropäische Mauereidechsenvorkommen in Oberösterreich, die als etabliert gelten (d. h. selbständig reproduzierende Populationen ausbilden, vgl. Grillitsch und Cabela, 2001) und gebietsfremde Schildkrötentaxa, die sich bislang nicht dauerhaft im Freiland fortpflanzen, aber aus naturschutzfachlicher Sicht als problematisch bewertet werden (Kleewein und Wöss, 2010). Amphibien und Reptilien spielen eine wichtige Rolle als Räuber von Wirbellosen und als Beute für andere Tiere in aquatischen und terrestrischen Lebensräumen. Sie gelten auch als ausgezeichnete Indikatoren für den Zustand von Ökosystemen.

Sensitivität in Bezug auf Klimavariablen und Klimawandelfolgen in Österreich

Aufgrund ihrer Lebensraumansprüche und geringen Mobilität gelten Amphibien als besonders durch den Klimawandel gefährdet (z. B. Henle et al., 2008; Blaustein et al., 2010; Rödder und Schulte, 2010). Die projizierte Änderung der Niederschlagsverteilung ist als Gefährdungsfaktor vermutlich von größerer Bedeutung als Temperaturveränderungen (Gollmann, 2007). Im Vordergrund stehen indirekte Auswirkungen als Folge von Lebensraumverlust, z. B. der mögliche Rückgang von ephemeren und periodischen Kleingewässern und der Verlust von Feuchtlebensräumen als Folge häufiger auftretender oder verlängerter Trockenperioden (z. B. McMenamin et al., 2008). Direkte Auswirkungen auf die Phänologie, Populationsbiologie und Verbreitung sind bekannt oder werden vermutet, sind bisher aber bei europäischen Arten noch kaum genauer untersucht.

Der Lebenszyklus von Amphibien erfordert eine gesonderte Betrachtung des Risikos für die jeweiligen Lebensabschnitte. Generell beschleunigen höhere Wassertemperaturen die Entwicklung von Amphibienlarven. Durch die geringere Sauerstofflöslichkeit bei höheren Temperaturen kann aber die Sauerstoffaufnahme negativ beeinflusst und die Entwicklung gestört werden. Die mögliche Folge ist eine verringerte Körpergröße bei der Metamorphose. Die Überlebensraten der Larven sind jedoch auch von anderen Faktoren, insbesondere ihrer Häufigkeit und der Nahrungsverfügbarkeit im Gewässer, abhängig (Blaustein et al., 2010). Beim Fadenmolch vermindert eine höhere Wassertemperatur die Anzahl der abgelegten Eier (Galloy und Denoel, 2010). Neben den Auswirkungen in den Laichgewässern sind mögliche Änderungen der Sommer- und Winterlebensräume sowie deren Konnektivität zu beachten (Kyek et al., 2003).

Physiologische Reaktionen auf veränderte Temperaturbedingungen und negative Auswirkungen von Extremereignissen, wie z. B. Hitzewellen (Neveu, 2009), sind zu erwarten. Die Wahrscheinlichkeit, von Spätfrösten überrascht zu werden, erhöht sich für Frühjahrsarten. Ein erhöhter Energieverbrauch in wärmeren Winterquartieren wurde für die Erdkröte in England festgestellt und mit verringerter Fitness und erhöhter Krankheitsanfälligkeit in Verbindung gebracht (Reading, 2007). Wird das Geschlecht der Nachkommen durch die Inkubationstemperatur während der Embryogenese bestimmt, wie es bei vielen Reptilien der Fall ist, sind Verschiebungen des Geschlechterverhältnisses möglich (Hulin et al., 2009). Auch verhaltensbiologische Anpassungen sind zu erwarten, vor allem reduzierte Aktivitätsphasen bei zunehmender Trockenheit, die negative Auswirkungen auf Nahrungssuche, Fortpflanzung, Ausbreitung und damit die Populationsentwicklung haben können. Nach einem schneearmen Winter entstehen im Frühjahr weniger Tümpel. Die Springfrösche und Gelbbauchunken im Lainzer Tiergarten haben daher z. B. im Jahr 2012 vermehrt in den Wienerwaldbächen abgelaicht, wo die kühleren Bedingungen die Entwicklung – trotz eines überdurchschnittlich warmen Jahres – verzögern.

Eine phänologische Verschiebung hin zu vorverlegten Ablaichterminen ist aus mehreren Regionen Europas bekannt, z. B. 2 bis 5 Tage pro Grad Celsius Temperaturerhöhung für Fadenmolch und Teichmolch in Wales (Chadwick et al., 2006), 5 bis 10 Tage beim Grasfrosch in England (Carroll et al., 2009) und rund einen Monat in Frankreich (Neveu, 2009), 8 bis 9 Tage bei Grasfrosch und Erdkröte in Polen (Tryjanowski et al., 2003) und rund ein Monat bei einer subalpinen Erdkrötenpopulation in der Schweiz (Vittoz et al., 2010; vgl. Abbildung 3.10). Für Österreich liegen bislang keine Untersuchungen vor (Kyek et al., 2003). Phillimore et al. (2010) konnten zeigen, dass eine Vorverlegung des Ablaichtermines um 5 bis 9 Tage für den Grasfrosch (*Rana temporaria*) in Großbritannien je nach lokalen Wetterbedingungen möglich ist, für eine Anpassung an die prognostizierten Temperaturerhöhungen bis 2070 aber eine Vorverlegung um 21 bis 39 Tage erforderlich sein könnte.

Zeitliche Verschiebungen des Wanderverhaltens sind ebenfalls zu vermuten, für Mitteleuropa bislang jedoch nicht eindeutig festzustellen (Kyek et al., 2003). Es ist zu erwarten, dass

Box 3.7: Chytridiomykose – eine neuartige Bedrohung für Amphibien
Box 3.7: Chytridiomycosis – an emerging threat to amphibians

Der Chytridpilz (*Batrachochytrium dendrobatidis*) verursacht das Krankheitsbild der Chytridiomykose und wurde 1998 bei tropischen Fröschen in Australien und Mittelamerika entdeckt. Der Pilz stammt vermutlich aus Afrika und wurde mit der Verwendung des Krallenfrosches (*Xenopus laevis*) als Versuchstier und in weiterer Folge durch den Handel mit Amphibien in alle Kontinente verschleppt (Measey et al., 2012). Zwischen Gewässern erfolgt die Ausbreitung durch mit Zoosporen belastetes Wasser, das zum Beispiel mit Angelzubehör transportiert wird. In Europa wurde der Pilz bereits in mehreren Ländern nachgewiesen, in Spanien wird der Rückgang von Geburtshelferkröte, Erdkröte und Feuersalamander direkt mit dem Pilz in Verbindung gebracht (Bosch et al., 2001). Der Pilz ernährt sich vom Keratin in der Hornsubstanz der Amphibienhaut und führt zu deren Ablösung. Die Tiere stellen häufig die Nahrungsaufnahme ein und in Verbindung mit anderen Stressfaktoren endet die Infektion oft tödlich. Das weltweit beobachtete Amphibiensterben wird – unter anderem – mit der Chytridiomykose in Verbindung gebracht. Die Auswirkungen sind jedoch sehr variabel und können – auch innerhalb einer Art – von 0 bis nahezu 100 % Mortalität reichen; offenbar sind dafür verschiedene Faktoren verantwortlich, wie zum Beispiel Immunabwehr oder Habitatbeschaffenheit (Daszak et al., 2003).

Studien zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Ausbreitung und Mortalität des Chytridpilzes zeigen unterschiedliche Ergebnisse. Während Pounds et al. (2006) und Bosch et al. (2007) eine Förderung der Ausbreitung feststellten, konnten Lips et al. (2008) keinen Zusammenhang nachweisen. Garner et al. (2011) konnten experimentell zeigen, dass bei Erdkröten (*Bufo bufo*) höhere Überwinterungstemperaturen die Infektionsrate erhöhen. Sie stellten aber auch fest, dass die Überlebensrate der Tiere vor allem von ihrem Körpergewicht im Winter abhängt und nicht von der Umgebungstemperatur oder der Infektionsrate. Die höchsten Mortalitätsraten wurden bisher in montanen Höhenlagen festgestellt, alpine Lebensräume scheinen aber für den Chytridpilz ungeeignet und könnten so potentielle Refugialräume für Amphibien schaffen (Sztatecsny und Hödl, 2009), die durch den Klimawandel in höhere Lagen abwandern müssen. Aufgrund der komplexen Wechselbeziehungen in Wirt-Parasit-Systemen unter Klimawandelbedingungen sind weitere Studien für mitteleuropäische Lebensräume erforderlich, um die möglichen Auswirkungen dieser Krankheit beurteilen zu können.

die Auswirkungen art- und populationsspezifisch verschieden stark ausfallen und Adaptation sowie Akklimatisation wichtige Rollen bei der Bandbreite möglicher Reaktionen der Arten spielen (Blaustein et al., 2010).

Araújo et al. (2006) projizierten großmaßstäbliche Arealerweiterungen für Amphibien und Reptilien in Europa bei ungehinderter Ausbreitung und Arealverluste bei fehlender Ausbreitung. Die Übertragbarkeit der Projektionen auf kleinere räumliche Skalen ist jedoch schwierig. Während eine großräumige Einwanderung wärmeliebender Arten aus dem Mittelmeergebiet nach Österreich aufgrund der in der Regel geringen Ausbreitungsfähigkeit der Arten, der Fragmentierung geeigneter Habitate und bestehender Migrationsbarrieren kaum zu erwarten ist, ist eine kleinräumige Erweiterung (oder Verschiebung) der Areale von Tieflandarten in höhere Lagen denkbar, wie sie in der Schweiz bereits beobachtet wird (Vittoz et al., 2010).

Die Lebensräume kälteadaptierter Arten (z. B. Alpensalamander, Bergmolch) könnten zurückgehen, detaillierte Untersuchungen zu Änderungen der Areale oder Höhenverbreitung der Amphibien und Reptilien in Österreich liegen aber nicht vor. In einer auf biologischen Eigenschaften der Arten beruhenden Klimasensitivitätsanalyse (Rabitsch et al., 2010) und bei Habitatmodellierungen (mit bis zu 75 % projiziertem Arealverlust bis 2100; ohne Ausbreitung; Beierkuhnlein et al., 2012) wurde für den Alpensalamander in Deutschland ebenfalls ein hohes Risiko durch den Klimawandel festgestellt. D'Amen und Bombi (2009) konnten einen Zusammenhang zwischen Temperaturerhöhung und Artenrückgang in Italien feststellen.

Der mögliche Zusammenhang zwischen dem weltweit beobachteten Amphibiensterben, dem Klimawandel und der Ausbreitung des Chytridpilzes wurde in den letzten Jahren besonders intensiv erforscht (siehe Box 3.7), wobei Kombinationen verschiedener Ursachen für den Artenrückgang als Erklärung am wahrscheinlichsten sind.

Reptilien gelten allgemein eher als potentieller Gewinner des Klimawandels, vor allem wegen der meist thermophilen

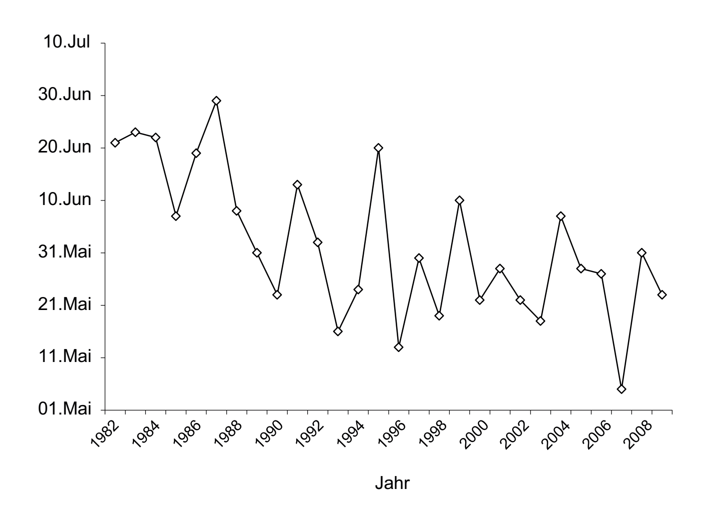


Abbildung 3.10 Zeitliche Verschiebung der Maxima der Laichwanderung einer Erdkrötenpopulation auf der Großen Scheidegg (1.850 m Seehöhe) im Berner Oberland (Schweiz). Quelle: Verändert nach Vittoz et al. (2010)

Figure 3.10 Temporal shift of spawning maxima of common toads at Großer Scheidegg (1850 m asl) in Switzerland. Source: Modified after Vittoz et al. (2010)

Habitatansprüche. Chamaillé-Jammes et al. (2006) konnten einen Anstieg der Körpergröße und des Reproduktionserfolges sowie verringerte Abwanderungstendenzen der Jungtiere für die Waldeidechse (*Zootoca vivipera*) in den französischen Alpen feststellen. Mit verlängerten sommerlichen Bedingungen ist für Reptilien- und Amphibienarten in Österreich ein Anstieg des Reproduktionserfolges zu erwarten. Eine zukünftig erfolgreiche Reproduktion gebietsfremder Schildkrötenarten im Freiland wird für Mitteleuropa erwartet (Ficetola et al., 2009) bzw. vereinzelt bereits beobachtet (Kleewein und Wöss, 2011).

Fische

Abgrenzung und Charakterisierung

Das heimische Artenspektrum umfasst inklusive Neunaugen 84 Arten, wovon 4 Arten nur in Seen, 43 Arten in Fließgewässern und 18 Arten in beiden Ökosystemen anzutreffen sind (Wolfram und Mikschi, 2007). In Österreich kommen entsprechend der gemäßigten Klimazone und der topographischen Verhältnisse Fischarten vor, die an den unteren und mittleren Temperaturbereich angepasst sind. Als Endglieder der Nahrungskette spiegeln sie wesentliche Prozesse der gesamten Nahrungskette wider.

Sensitivität in Bezug auf Klimavariable

Fische benötigen als wechselwarme Organismen mehrfach ungesättigte Strukturlipide, um ihre Zellmembranen für physiologische Prozesse elastisch und funktionell zu halten. Obwohl kürzlich erfolgte Forschung unser Wissen über die Retention von Fetten in verschiedenen aquatischen Taxa österreichischer Gewässer erweitert hat (z. B. Heissenberger et al., 2010; Schultz et al., 2012), wissen wir noch nicht, welche Effekte unterschiedliche Temperaturen auf die Lipidzusammensetzung der Zellmembranen von aquatischen Organismen, ihr somatisches Wachstum, Reproduktion und Überleben haben.

Klimawandelfolgen in Österreich

Detaillierte und umfassende Informationen hinsichtlich der Temperaturpräferenzen heimischer Fischarten liegen nur für Salmoniden vor (siehe Beispiel Bachforelle Abbildung 3.11). Hohe Temperaturen können sich sowohl auf das Verhalten von Bachforellen, als auch auf ihr Wachstum, Reproduktion und Sterberate auswirken, was schließlich zu einer Verdrängung durch besser angepasste Fischarten führt. Beobachtungen an der Oberen Traun im Sommer 2012 zeigten, dass hohe Temperaturen (bis zu 21 °C an der Bachsohle) vor allem große Bachforellen, welche einen besonderen ökologischen und ökonomischen Wert darstellen, negativ beeinflussen können (H. Ficker, pers. Mitt.; StartClim2013.A[1]). Bei anderen Arten ist der Wissensstand äußerst lückenhaft. Daher ist derzeit nur eine vergleichsweise grobe Einteilung möglich in obligatorische Kaltwasserfischarten (*oligo-stenotherm*) – die auf kalte Gewässer beschränkt sind – und Arten, die an wärmere Temperaturen angepasst sind (*meso-eurytherm*).

Während bei den *oligo-stenothermen* Arten der gesamte Lebenszyklus auf einen vergleichsweise niedrigen Temperaturbereich beschränkt ist, variieren die Temperaturansprüche und Toleranzen bei den *meso-eurythermen* Arten in Abhängigkeit von Lebensstadium und Jahreszeit beträchtlich. So sind z. B. für eine erfolgreiche Reproduktion der *meso-eurythermen* Arten im Frühjahr bzw. Sommer bestimmte Minimaltemperaturen erforderlich. Im Sommer werden wesentlich höhere Temperaturen präferiert und toleriert als von Kaltwasserfischarten. Auch bezüglich der Verbreitung von nicht heimischen Fischarten sind in Österreich Veränderungen dokumentiert, die in Zusammenhang mit einer Klimaänderung stehen können. Von den fünfzehn in Österreich etablierten nicht heimischen Fischarten (Wiesner et al., 2010; Rabitsch et al., 2013) ist nur die Regenbogenforelle weit verbreitet, die im Vergleich zu den heimischen Salmoniden etwas toleranter gegenüber höheren

[1] http://www.austroclim.at/index.php?id=startclim2013

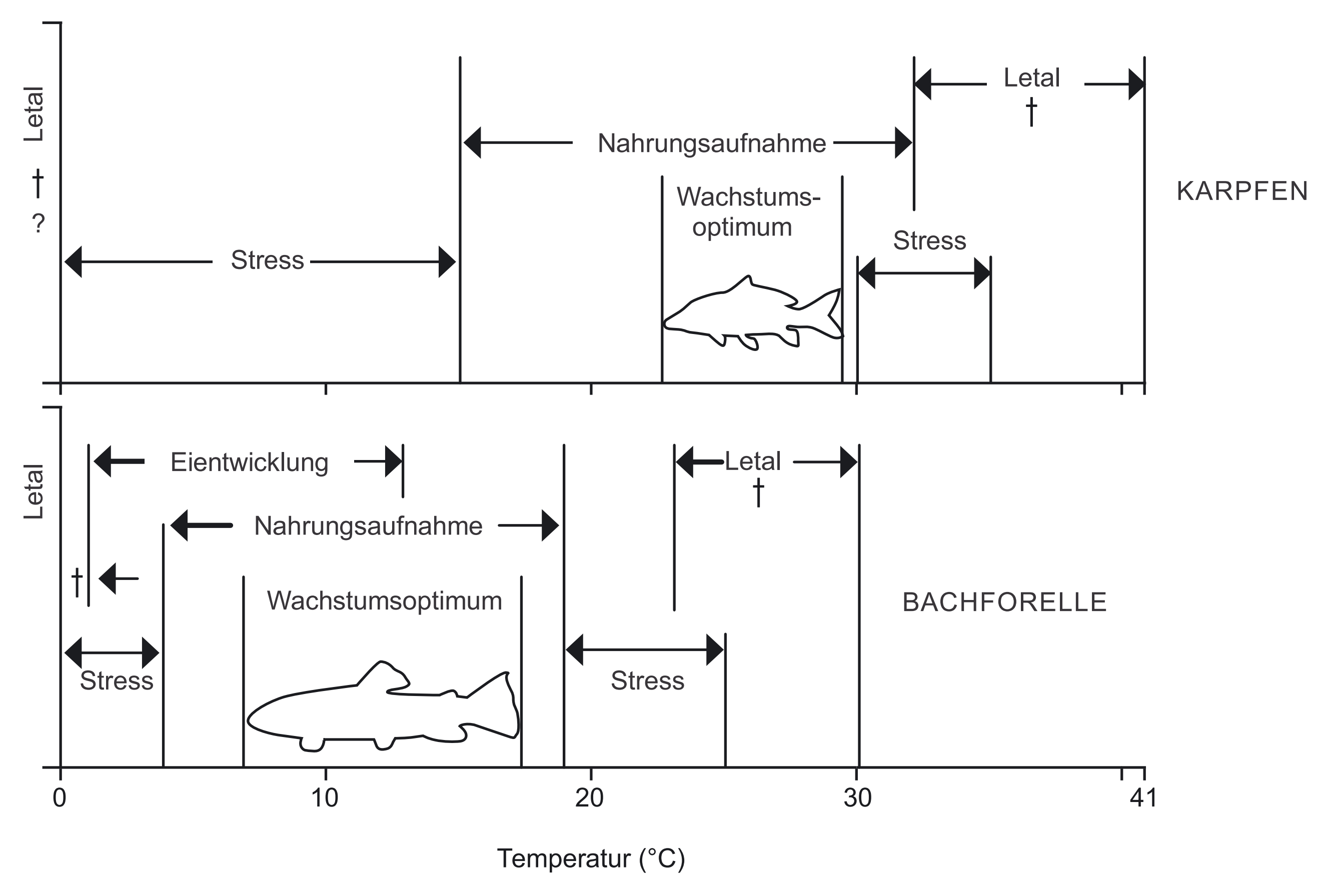


Abbildung 3.11 Unterschiedliche Temperaturansprüche im Lebenszyklus von Karpfen (*Cyprinus carpio*) und Bachforelle (*Salmo trutta*). Aus Essl und Rabitsch (2013). Verändert nach Langford (1990)

Figure 3.11 Diverging temperature requirements within the life cycle of common carp (*Cyprinus carpio*) and brown trout (*Salmo trutta*) Essl and Rabitsch (2013). Adapted from Langford (1990)

Wassertemperaturen ist. In den letzten Jahren sind in der österreichischen Donau zwei invasive Fischarten eingewandert, die Kesslergrundel (*Neogobius kessleri*) und die Schwarzmundgrundel (*Neogobius melanostomus*), die nunmehr in weiten Bereichen den Fischbestand der Donau dominieren. Diese Arten bevorzugen ähnliche Habitate wie heimische Arten (z. B. Koppe [*Cottus gobio*]), sind jedoch temperaturtoleranter und können daher heimische Arten verdrängen (Wiesner et al., 2010). Auch der aus Nordamerika stammende Sonnenbarsch *Lepomis gibbosus* und der aus Ostasien stammende Blaubandbärbling *Pseudorasbora parva* bevorzugen wärmere Gewässer und könnten von einer Erwärmung profitieren (Rabitsch et al., 2013).

Als Folge der Wassertemperaturveränderungen ist eine Verschiebung von kaltwasserliebenden hin zu warmwasserliebenden Arten und folglich eine Verschiebung der Fischregionen zu erwarten (siehe auch Abschnitt 3.3.6). So könnte eine Erwärmung von 2,5 °C (Jahresmitteltemperatur) eine höhenzonale Verschiebung der Fischregionen von 70 m bzw. eine Verlagerung der Fischregionen flussaufwärts im Ausmaß von ca. 30 km bedeuten. Diese theoretische Verschiebung flussaufwärts wird aber in vielen Fällen nicht möglich sein, da die Gewässer flussaufwärts in vielen Fällen für Fische zu klein sind. Insgesamt ist daher mit einem Verlust an Forellen- und Äschengewässern zu rechnen. Innerhalb der Gruppe der Salmoniden würde das eine weitere Zunahme des Anteils der Regenbogenforelle bedeuten. Auch bei anderen Fischarten wird sich der Klimawandel indirekt über Konkurrenz mit exotischen Arten auswirken.

Mehr als die Hälfte der heimischen Fischarten scheint bereits in den Roten Listen auf (z. B. Wolfram und Mikschi, 2007). Zusätzliche Belastungen durch Klimaänderungen werden zu einer zunehmenden Gefährdung der heimischen Fischfauna führen.

Vögel

Abgrenzung und Charakterisierung

In Österreich kommen etwas mehr als 200 regelmäßig nachgewiesene Brutvogel-Arten vor, davon 150 allein im Neusiedler See-Gebiet. Hinzu kommen rund 200 Gastvogelarten und Durchzügler, also Arten die im Gebiet nicht regelmäßig brüten. Vögel werden häufig als Indikatoren herangezogen, da sie empfindlich und rasch auf Umweltveränderungen reagieren und die Datenlage zur Verbreitung vergleichsweise gut ist. Aktuell werden Daten für eine Neubearbeitung des Österreichischen Brutvogelatlas erhoben.

Sensitivität in Bezug auf Klimavariable

Steigende Temperaturen führen bei Vögeln zu phänologischen Änderungen, dies betrifft insbesondere Ankunfts- und Abflugzeiten der Zugvögel (IPCC, 2014), weiters kommt es zu Änderungen der Vorkommensgebiete (Verschiebungen der Areale und Höhenvorkommen) sowie zu populationsbiologischen Änderungen. Je nach Ausbreitungsfähigkeit, Anpassungskapazität und physiologischer Toleranz reagieren die Arten und Populationen unterschiedlich. Standvögel, die zum Überwintern nicht in südliche Gebiete wandern, brüten früher und können dadurch Brutgebiete besetzen, noch bevor die Zugvögel aus dem Süden im Frühling heimkehren. Für Zugvögel sind veränderte phänologische Muster insbesondere wegen der möglichen Desynchronisation mit der Verfügbarkeit ihrer Nahrung problematisch.

Änderungen des Zugverhaltens bei Vögeln zählen zu den am besten dokumentierten biologischen Reaktionen auf globale Erwärmung in den letzten zwei Jahrzehnten (Root et al., 2003; Parmesan, 2007). So konnten z. B. Berthold et al. (1992) zeigen, dass kurze Strecken ziehende Mönchsgrasmücken (*Sylvia atricapilla*), darunter auch Exemplare aus Oberösterreich im Herbst nicht mehr Richtung Südwesten nach Spanien, sondern nordwestlich nach Großbritannien mit seinen milder werdenden Wintern ziehen und dort überwintern. Both und Visser (2001) zeigten anhand einer Langzeitstudie an Trauerschnäppern (*Ficedula hypoleuca*), dass diese im Schnitt 10 Tage früher beginnen Eier zu legen als noch vor 30 Jahren. Da aber die Ankunftszeit gleich geblieben ist, wird die Zeit für die Brutvorbereitungen immer kürzer, was den Stress erhöht und sich negativ auf das Brutgeschehen auswirkt. Weitere Beispiele gibt es nicht nur von Untersuchungen an ausgewählten Arten, sondern auch von Langzeit-Fangprogrammen an bestimmten Beringungsstationen. Anhand von Daten aus Nordamerika konnte gezeigt werden, dass Kurzstreckenzieher schneller auf Erwärmung reagieren als Mittel- oder Langstreckenzieher (Miller-Rushing et al., 2008). Diese unterschiedlichen Ergebnisse zwischen Vögeln mit verschiedenen Zugstrategien waren noch stärker bei Untersuchungen, die sich mit dem Herbstzug auseinandersetzten. Jenni und Kery (2003) stellten fest, dass Langstreckenzieher, die südlich der Sahara überwintern, früher aus Europa wegziehen als noch vor 30 Jahren. Kurz- bzw. Mittelstreckenzieher (überwintern nördlich der Sahara) ziehen jedoch später ab bzw. versuchen sogar zu überwintern.

Klimawandelfolgen in Österreich

In Österreich gibt es kaum vergleichbare, über Jahrzehnte andauernde Untersuchungen. Winkler et al. (2004) konnten mittels Beobachtungsdaten an kurze Strecken ziehenden Vogelarten einen Trend zur höheren Anzahl an überwinternden Individuen zeigen, sowie bei Blaumeisen (*Cyanistes caeruleus*) einen Trend zu früherem Brutbeginn. In Summe fehlen in Österreich jedoch standardisierte ornithologische Untersuchungen, die durchgehend Daten über die letzten drei Jahrzehnte beinhalten. Einzig das von der deutschen Vogelwarte Radolfzell initiierte Mettnau-Reit-Illmitz-Programm, im Zuge dessen in Illmitz standardisiert Vögel während des Herbstzuges gefangen und markiert wurden, liefert zumindest teilweise entsprechende Daten über einen längeren Zeitraum. Für Populationen aus Österreich und aus anderen Teilen Europas ist das Gebiet des Neusiedler Sees ein wichtiger Rastplatz. Obwohl der Großteil der Datenauswertung und des Vergleichs mit den vorhergehenden drei Jahrzehnten noch nicht abgeschlossen ist, zeigt bereits der Vergleich von ausgewählten Arten interessante Veränderungen. Österreich ist aufgrund der Unterzeichnung von internationalen Richtlinien, wie zum Beispiel der EU-Vogelschutzrichtlinie und der Bonner-Konvention, zur wissenschaftlichen Bearbeitung und zum Monitoring wandernder Vogelarten verpflichtet. Aufgrund fehlender wissenschaftlicher Institutionen und langfristiger Finanzierungen kann diesen Aufgaben allerdings derzeit nicht nachgekommen werden.

Nutztiere

Abgrenzung und Charakterisierung

Höhere Temperaturen und trockenere Sommer können großen Einfluss auf die Leistung von Nutztieren und auf die Tiergesundheit in den gemäßigten Breiten haben. In diesem Kapitel werden mit Rindern, Schweinen und Geflügel die wichtigsten landwirtschaftlichen Nutztierartengruppen in Österreich behandelt. Zum größten Teil werden diese Nutztiere in Österreich ganzjährig oder temporär in geschlossenen Stallsystemen gehalten. Die Witterung (insbesondere Hitze) hat entweder direkten Einfluß auf die Tiere (Aufenthalt im Frei-

en) oder indirekt, z. B. über die Raumtemperaturen und den Luftaustausch nach außen.

Sensitivität in Bezug auf Klimavariable

Neben direkten klimatischen Auswirkungen auf Nutztiere über das Temperaturregime werden zukünftig vermutlich eine Vielzahl an neuen bzw. exotischen Infektionskrankheiten zu berücksichtigen sein. Besonders Krankheitserreger, die von Arthropoden wie Stechmücken oder Zecken übertragen werden, werden zunehmende Verbreitung finden. Steigende Temperaturen und vermehrt auftretende Hitzewellen spielen dabei in Österreich eine bedeutende Rolle, insbesondere in den wärmeren Klimaregionen Österreichs, in denen Tierhaltung betrieben wird. Im Folgenden werden die Auswirkungen eines Klimawandels in den unterschiedlichen Teilaspekten dargestellt (nach: Grummer, 2009).

Landwirtschaftliche Nutztiere sind gleichwarme (homoiotherme) Tiere. Im Gegensatz zu wechselwarmen (poikilothermen) Tieren können sie ihre Körpertemperatur selbst regulieren, was sie in ihren Aktivitäten weitgehend unabhängig von der Umgebungstemperatur macht (Engelhardt und Breves, 2000). Abweichungen der Körperkerntemperatur oberhalb kritischer Werte führen zu erhöhter Wärmeabgabe und verminderter Wärmeproduktion bei Hitzebelastung bzw. erhöhter Wärmekonservierung und Wärmebildung bei Kältebelastung. In der Folge kann es in diesen Situationen zu einem Leistungsverlust anderer physiologischer Systeme kommen, was sich beispielsweise in einem Rückgang der Milchleistung bei Kühen oder in der Abnahme der Eigröße bei Legehennen äußern kann (Groth, 1984; Smith, 1973). Eine Klimaerwärmung mit häufigeren bzw. länger andauernden Hitzeperioden wird für Nutztiere deutliche Anforderungen bezüglich ihrer Stressbelastung bzw. ihrer Anpassungsmechanismen stellen. Jede Tierart besitzt in Abhängigkeit vom Alter eine thermoneutrale Zone, d. h. einen Temperaturbereich, der keine Energie zur Thermoregulation erfordert und das Optimum für eine hohe Leistungsfähigkeit darstellt (Poczopko, 1984). Neben der Umgebungstemperatur beeinflusst aber auch die Luftfeuchte und die Luftströmung das thermische Wohlbefinden der Tiere. Liegt die Umgebungstemperatur oberhalb der thermoneutralen Zone, wird die Wärmebildung herabgesetzt und die Wärmeabgabe erhöht. Dies geschieht durch die Erweiterung von Gefäßen und durch vermehrtes Schwitzen (Engelhardt und Breves, 2000). Das Tier kann, je nach Möglichkeiten der Haltungsform, auch durch ein verändertes Verhalten auf zu hohe Umgebungstemperaturen reagieren (z. B. Schattenplätze, Suhlen). Bei Tierarten ohne ausreichende Schweißbildung erfolgt die Abgabe von Wärme hauptsächlich über die Schleimhäute des Nasen-Rachen-Raums (z. B. durch Hecheln). Beide Reaktionen können bei den verschiedenen Tierarten unter thermischer Belastung unterschiedlich stark gesteigert werden.

Kann trotz aller Maßnahmen zur Wärmeabgabe die im Stoffwechsel erzeugte Wärme nicht abgeführt werden, kommt es zur Hyperthermie und Hitzestress. Die Schwere des Hitzestresses wird durch die aktuelle Temperatur und Luftfeuchtigkeit, aber auch durch die Länge der Hitzestress-Periode, das Ausmaß der Abkühlung in der Nacht sowie Ventilation und Luftgeschwindigkeit beeinflusst (Nienaber et al., 1999). Neben klimatischen Faktoren kommen individuelle Faktoren, wie die Größe des Tieres, Dichte und Farbe des Haarkleids und möglicherweise genetische / züchterische Merkmale hinzu.

Rinder

Besonders Milchvieh leidet aufgrund seiner hohen Leistung schnell unter zu hohen Temperaturen. Im Stoffwechsel der Rinder fällt viel Wärme durch die Aktivität der Pansenflora und durch die Milchbildung an (Engelhardt und Breves, 2000). Die Wärmeabgabe ist wegen des Verhältnisses von Körpervolumen zu Körperoberfläche eingeschränkt. Die Tiere halten sich bei Hitzestress vermehrt im Schatten auf und zeigen eine erhöhte Atemfrequenz, der Effekt auf die Milchleistung ist zunächst gering. Bei steigendem Hitzestress fangen die Tiere verstärkt an zu speicheln, die Atemfrequenz erhöht sich weiter und die Tiere schwitzen. Die Wasseraufnahme steigt an, um den durch das Schwitzen entstandenen Flüssigkeitsmangel auszugleichen. Die Futteraufnahme wird hingegen reduziert, obwohl durch die Veränderungen der Körpertemperatur und der Atemfrequenz ein erhöhter Energiebedarf besteht, weshalb die Energiebereitstellung für die Milchproduktion sinkt. Bei einem ausgeprägten Hitzestress sind die Tiere in ihrem Verhalten und Wohlbefinden deutlich eingeschränkt und es können fieberhafte Temperaturen erreicht werden (beim erwachsenen Rind > 39 °C). Die Milch- und Reproduktionsleistungen fallen erheblich ab und es besteht Gefahr für das Leben des Tieres. Durch vermehrtes Schwitzen und Abatmen besteht ein erhöhter Bedarf an Mineralstoffen wie Natrium und Kalium. Wird dieser Bedarf nicht gedeckt, kann es zu einer tödlichen Verschiebung im Säure-Basen-Haushalt kommen (respiratorische Alkalose, d. h. der pH-Wert des Blutes erhöht sich; vgl. Beatty et al., 2006).

Geflügel

Da Vögel keine Schweißdrüsen haben, sind sie in ihren Möglichkeiten zur Wärmeabgabe erheblich eingeschränkt. Tagestemperaturen von über 30 °C und fehlende Abkühlung in der Nacht verursachen bei allen Geflügelarten Hitzestress (Bogin

et al., 1996). Besonders bei gleichzeitig hoher Luftfeuchtigkeit wird der Temperaturausgleich für die Tiere erschwert und sie versuchen sich über locker gespreizte und herabhängende Flügel und eine stärkere Durchblutung der unter der Haut gelegenen Blutgefäße abzukühlen. In der Folge sinkt die Futteraufnahme und der Wasserverbrauch steigt an. Durch die benötigte Temperaturregulierung steigt der Energieverbrauch, so dass weniger Energie für andere Körperfunktionen zur Verfügung steht und Stoffwechselfunktionen eingeschränkt werden. Dies äußert sich bei Legehennen zunächst in einer Abnahme der Eigröße, Rückgang der Legeleistung, Verschlechterung der Eischalenqualität und helleren Eidottern (Smith, 1973). Nähert sich die Umgebungstemperatur der Körpertemperatur der Hühner (40-41 °C), atmen die Tiere mit geöffnetem Schnabel, um über die Verdunstung von Wasser über die Atemwege Wärme abzugeben. Dabei erhöht sich die Atemfrequenz bis zum Hecheln. Wenn die Körpertemperatur trotzdem weiter ansteigt, werden die Vögel matt und sterben innerhalb weniger Stunden. Der Hitzetod kann bereits bei Stalltemperaturen von 35 °C und über 75 % Luftfeuchtigkeit auftreten (Bogin et al., 1996). Die genannten Risikobereiche bei den Temperaturen werden in allen Erwärmungsszenarien häufiger vorkommen und lassen die Notwendigkeit von baulichen Anpassungsmaßnahmen als sehr wahrscheinlich erscheinen.

Schweine

Auch Schweine können nicht schwitzen und sind bei höheren Temperaturen auf andere Abkühlungsmöglichkeiten angewiesen. Die Tiere beginnen bei Hitzestress zu hecheln und versuchen sich durch Ablegen an kühlen und wenn möglich feuchten Stellen der Hitze zu entziehen. Durch das Ablegen auf feuchten Stellen wird eine Benetzung des Körpers erreicht und Verdunstungskälte erzeugt. Wenn keine Suhle zur Verfügung steht, legen sich die Tiere gezwungenermaßen auch auf die Kotfläche der Bucht, was mit erheblichen Verschmutzungen der Tiere einhergeht. Bei Mastschweinen wird bei Hitzestress eine verminderte Futteraufnahme mit reduzierten Mastleistungen beobachtet, bei Zuchtschweinen leidet die Spermaqualität, die Umrauschquote (prozentueller Anteil der belegten Sauen) steigt und Verlustraten bei Ferkeln durch Erdrücken steigen an. Ungenügende Futteraufnahme hat unmittelbare Folgen beim nächsten Wurf und führt zu einer Beeinträchtigung der nächsten Brunst. Ferner haben Untersuchungen gezeigt, dass die Hitzebelastung das Immunsystem beeinträchtigt, was die Anfälligkeit für Krankheiten erhöht (Salak-Johnson und McGlone, 2007). Durch die wenig behaarte und wenig pigmentierte Haut sind die meisten Schweinerassen anfällig für Sonnenbrand. Bei Schweinen kann Hitzestress in Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit bereits ab 21 °C einsetzen.

Klimawandel und Infektionskrankheiten bei Nutztieren

Ein Klimawandel kann die Voraussetzungen für das Neuauftreten oder die Rückkehr von Krankheitserregern in unsere Breitengrade schaffen. Durch eine Klimaerwärmung finden verschiedene Arthropodengruppen, wie Stechmücken, Fliegen oder Zecken, die bislang nur in Südeuropa heimisch waren, auch in Österreich klimatisch günstige Bedingungen vor, so dass die Alpen ihre Funktion als natürliche Nordgrenze des Vorkommens vieler durch Arthropoden übertragener Infektionskrankheiten verlieren werden. Verlässliche Voraussagen über das Auftreten neuer Infektionskrankheiten als Folge der Klimaerwärmung gestalten sich jedoch schwierig, denn erst das Zusammenspiel verschiedener Faktoren ermöglicht es Erregern von Infektionskrankheiten, sich in neuen geographischen Regionen zu etablieren und auszubreiten. Neben den direkten Umwelteffekten auf den Erreger und den Wirt, werden vor allem die Effekte auf die übertragenden Vektoren großen Einfluss nehmen.

Klimawandeleffekte auf Krankheitserreger

Für virale Krankheitserreger werden die direkten Effekte eines Klimawandels nur eingeschränkte Bedeutung haben, denn Viren sind obligat intrazelluläre Parasiten und benötigen für ihre Vermehrung lebende Zellen. Außerhalb von Organismen behalten die meisten von ihnen nur kurze Zeit ihre infektiösen Eigenschaften. Allerdings ist die Entwicklung von Viren, die von Insekten übertragen werden, temperaturabhängig. Der Vermehrungszyklus des Blauzungen-Virus (BTV) in der Überträger-Gnitze (verschiedene Arten der Mückenfamilie der Ceratopogonidae) dauert beispielsweise bei 25 °C 6 bis 8 Tage, bei 30 °C nur mehr 4 Tage. Bei Temperaturen unter 10 °C findet keine Virusvermehrung in den Gnitzen statt (Van Dijk und Huismans, 1982).

Bakterielle Infektionserreger könnten ebenfalls vom Klimawandel profitieren. Durch stärkere Niederschläge mit nachfolgenden Überschwemmungen können Abwässer und andere organische Abfälle in offene Gewässer wie Flüsse und Seen geschwemmt werden. Dadurch werden Nährstoffe in die Gewässer eingetragen, was unter gewissen Bedingungen die Massenentwicklung von Cyanobakterien (Blaualgen) begünstigt. Bei lange anhaltenden hohen Temperaturen, wie sie zukünftig in der warmen Jahreszeit erwartet werden, kommt es zu einer sehr raschen Vermehrung (Paul, 2008). Cyanobakterien bilden eine Reihe unterschiedlicher Gifte (Toxine) und stellen

eine bisher unterschätzte Gefahr für Tiere, Pflanzen und für die Trinkwasserversorgung dar. Die Bedrohung ist spätestens seit dem Verenden von Schafen und Hunden in Großbritannien und dem Tod von über 50 Rindern im Bereich hochalpin gelegener Bergseen in der Schweiz sehr ernst zu nehmen (Eitzinger et al., 2009b).

Auch Parasiten werden vom Klimawandel profitieren, da häufig Entwicklungszyklen, die außerhalb des Wirtes ablaufen, durch höhere Temperaturen begünstigt werden. Generationszeiten werden verkürzt und die Anzahl der Generationen pro Jahr erhöht. In direkter Folge nimmt die Populationsgröße zu. Lange und extreme Kälteperioden in den Wintermonaten, in denen Eier oder Larven der Parasiten abgetötet werden, könnte es zukünftig immer weniger geben. Stattdessen werden mildere Winter mit ausgeprägten Niederschlägen erwartet. Auch dies könnte sich positiv auf die Entwicklungszyklen einiger Parasiten auswirken.

Klimawandeleffekte auf Krankheitsüberträger

Zu den bedeutendsten Vektoren von Infektionskrankheiten zählen blutsaugende Insekten (u. a. Stechmücken, Läuse, Flöhe), Spinnentiere (Zecken) und Nagetiere (Ratten, Mäuse). Eine Klimaänderung wird deutliche Auswirkungen auf die Verbreitung von Vektoren und der von ihnen übertragenen Erreger haben.

Voraussetzung für das Auftreten einer Vektor(Überträger)-assoziierten Krankheit ist neben dem Vorhandensein eines geeigneten Vektors auch das Vorhandensein infizierter Wirte, an denen sich der Vektor infizieren kann (Reservoirwirte). Weiterhin müssen bestimmte klimatische Voraussetzungen erfüllt sein. In vielen Fällen ist eine Mindesttemperatur zur Entwicklung der Erreger im Vektor notwendig. Meist besteht eine positive Korrelation zwischen Entwicklungsgeschwindigkeit und ansteigender Temperatur, die aber einen Höchstwert nicht überschreiten darf, da es durch zu hohe Temperaturen zu Feuchtigkeitsverlusten und dem Eintrocknen von Biotopen kommt. Auch die Fähigkeit mancher Vektoren, sich mit Viren zu infizieren, variiert mit den Temperaturen (Lines, 1995).

Ein aktuelles Beispiel ist das Virus der Blauzungenkrankheit (BTV) und sein Arthropoden-Wirt, die Gnitzengattung *Culicoides*. Mit zunehmenden Temperaturen steigt die Wahrscheinlichkeit für die Gnitzenarten, sich mit BTV zu infizieren. Bei Temperaturen im Bereich von 27–30 °C sinkt zwar die Lebensdauer der Gnitzen, aber die Frequenz der Nahrungsaufnahme steigt und damit die Wahrscheinlichkeit Blut eines mit BTV-infizierten Wiederkäuers aufzunehmen (Wittmann und Baylis, 2000). Die ursprüngliche Verbreitung im Mittelmeerraum und die spätere Ausbreitung des BTV nach Norden hin wird als Folge des Klimawandels angesehen (siehe auch IPCC, 2014): Der wichtigste Überträger ist *Culicoides imicola*, eine wärmeliebende Gnitzenart, die ursprünglich nur in Afrika und Südostasien beheimatet war. *Culicoides imicola* benötigt für ihr Überleben monatliche Durchschnittstemperaturen von mindestens 12 °C. ExpertInnen vermuten, dass *C. imicola* im Verlauf der aktuellen Klimaerwärmung nach Norden wandert (Purse et al., 2005). Es scheint, dass bei uns noch andere Gnitzenarten an der Übertragung des BTV beteiligt sind, die an andere klimatische Bedingungen angepasst sind. Wie das BTV seinen Weg nach Österreich gefunden hat, ist nach wie vor ungeklärt (Enserink, 2006).

Ähnliches gilt möglicherweise für das Virus der Afrikanischen Pferdepest. Diese bei Pferden fast immer tödlich verlaufende Infektion ist in Europa sporadisch in den Jahren von 1987 bis 1990 in Spanien und Südportugal aufgetreten. Wie bei BTV ist die Verbreitung abhängig vom Vorkommen der *Culicoides*-Spezies. Auch für das Virus der Afrikanischen Pferdepest ist *C. imicola* der Hauptvektor und es ist zu vermuten, dass der Erreger genauso wie BTV in zuvor virusfreie Regionen eingeschleppt werden könnte. Ob allerdings das Virus der Afrikanischen Pferdepest sich an einheimische *Culicoides*-Arten adaptieren kann wie das BTV bleibt abzuwarten.

Das West Nil-Virus stammt ursprünglich aus Nordafrika und dem Vorderen Orient. Bis vor knapp zehn Jahren trat es nur in Afrika, Asien und Südeuropa in Erscheinung. 1999 kam es zu einem Primärausbruch in den USA. ExpertInnen vermuten, dass für die weitere Ausbreitung des West-Nil-Virus in Nordamerika eine besonders günstige Kombination von Wetterfaktoren verantwortlich war: Ein milder Winter, gefolgt von einem trockenen, heißen Sommer hat die Vermehrung der übertragenden Stechmücken begünstigt. Einmal aufgenommen, reifte das Virus dank der hohen Temperaturen rasch im Vektor heran (Dohm et al., 2002). Entsprechend schnell übertrugen die infizierten Stechmücken das Virus auf Vögel und eine Infektionslawine erfasste Mücken, Vögel und schließlich den Menschen. Heftige Regenfälle gegen Ende August erzeugten neue Wasserlachen, die den Mücken als Brutstätten dienten und schließlich eine weitere Welle an potenziellen Virus-Trägern freisetzten. Mittlerweile befindet sich das West-Nil-Virus auch in Europa auf dem Vormarsch. Zum ersten Mal seit 35 Jahren erkrankten 2007 wieder Pferde in der Camargue an dem Virus. Feucht-schwülere Bedingungen würden den Überträger des Virus stark begünstigen.

Durch den Klimawandel werden zukünftig nicht nur neue Infektionskrankheiten bei Nutztieren mit nachfolgenden potentiell schwerwiegenden ökonomischen Folgen zu erwarten sein, sondern es werden auch zunehmend sogenannte Zoono-

se-Erreger Verbreitung finden. Hierbei handelt es sich um Viren, Bakterien oder Parasiten, die vom Tier auf den Menschen übertragen werden können. Die Übertragung dieser Erreger erfolgt durch direkten Kontakt mit infizierten Tieren (Kontaktzoonose) oder durch den Konsum von Lebensmitteln tierischer Herkunft („Foodborne Disease").

Das durch ein Virus ausgelöste, mit Fieber und Gelenkbeschwerden einhergehende Chikungunya-Fieber wird durch die Asiatische Tigermücke (*Aedes albopictus*) übertragen, die sich in Europa ausgebreitet hat (siehe Band 2, Kapitel 6). In Europa ist das Chikungunya-Fieber als importierte Erkrankung bei rückkehrenden Tropenreisenden diagnostiziert worden und konnte sich kleinräumig in Italien ausbreiten. Nach verschiedenen Prognosemodellen ermöglicht ein Klimawandel die weitere Ausbreitung der Asiatischen Tigermücke in Europa, sodass theoretisch die Möglichkeit von Epidemien auch in Europa gegeben ist (Queyriaux et al., 2008).

3.3 Gesellschaften und Ökosysteme
3.3 Communities and ecosystems

3.3.1 Allgemeines

In den bisherigen Abschnitten von Kapitel 3 wurde der Stand des Wissens zu Klimawandelauswirkungen aus der Perspektive einzelner Arten beschrieben. Wegen der auf multiplen Zeit- und Raumskalen stattfindenden Interaktionen zwischen Arten und Habitaten können sich auf der Ebene von Artenvergesellschaftungen und Ökosystemen jedoch Reaktionsmuster ergeben, die bei artspezifischer Betrachtungsweise nicht erkannt werden können. Für einige besonders intensiv erforschte Ökosystemtypen sind die Auswirkungen eines Klimawandels bereits gut dokumentiert (z. B. alpine und nivale Habitate) oder durch Szenariosimulationen mit Ökosystemmodellen analysiert (z. B. Wälder, Agrarsysteme). Für den überwiegenden Teil der Lebensräume sind für Österreich jedoch keine entsprechenden Untersuchungen vorhanden. Nachfolgend wird für diejenigen Ökosysteme bzw. Gesellschaften, für die Literatur zu Klimawandelfolgen vorhanden ist, ein Überblick zu möglichen Auswirkungen von klimatischen Veränderungen gegeben.

3.3.2 Moore

Österreich weist aktuell ca. 21 000 ha Moorflächen auf. Die Verbreitungsschwerpunkte der Moore in Österreich liegen in den feucht-kühlen Gebieten des Alpenvorlandes und der Alpen (Jungmeier et al., 2004).

Moore reagieren potenziell sensitiv auf Klimaerwärmung, insbesondere jene, deren Wasserhaushalt aus Regenfällen gespeist wird. Insgesamt sind dies die ca. 4 000 ha sogenannter „Regenmoore", von denen die Hochmoore ca. 95 % umfassen (Niedermair et al., 2011). Selbst unter gemäßigten Klimaänderungsszenarien zeigen Simulationsstudien, dass ein großer Anteil der Moorgebiete in Österreich um die Mitte des 21. Jahrhunderts zunehmend Trockenheits- und Hitzestress ausgesetzt sein wird. Der erwartete Temperaturanstieg, gekoppelt mit Niederschlagsrückgängen, könnte insbesondere für die etwa 600 Hochmoore in Österreich kritisch werden (Walentowski et al., 2008; Essl et al., 2012).

Vor allem diejenigen Gebiete, die bereits durch andere Einflüsse in ihrem Wasserhaushalt gestört sind, werden durch zusätzliche negative Umwelteinflüsse einer erhöhten Gefährdung ausgesetzt. Für intakte Hochmoore stellen Temperaturerhöhungen von über 2 °C ein hohes klimatisches Risiko dar. Niedermoore sind von Niederschlagsveränderungen weniger stark betroffen, da sie durch ihre Anbindung an das Grundwasser alternative Wasserspeisungsmöglichkeiten aufweisen. Niedermoore und Verlandungsmoore im Umfeld von stehenden Gewässern können daher als relativ widerstandsfähig eingeschätzt werden (Niedermair et al., 2011).

3.3.3 Alpine und nivale Pflanzengesellschaften

Hochgebirgs-Ökosysteme sind in Bezug auf eine Erwärmung des Klimas besonders sensitiv, weil einem Höherwandern ihrer kälteadaptierten Flora und Fauna topographische bzw. edaphische Grenzen gesetzt sind. Nischen-basierte Modelle prognostizieren das regionale Aussterben vieler alpiner und nivaler Arten oder zumindest starke Arealverluste und zunehmende Fragmentierung der überlebenden Populationen (z. B. Dirnböck et al., 2003, 2011; Engler et al., 2011). Gegen solche Prognosen wurden Vorbehalte geäußert. Zum einen könnte die ausgeprägte Reliefenergie von Hochgebirgslandschaften das Überdauern der Arten in klimatischen Mikro-Nischen erlauben (Randin et al., 2009; Scherrer und Körner, 2010). Zum anderen berücksichtigen die verwendeten Modelle keine tatsächlichen Migrationsbewegungen, sondern schätzen den potentiellen Endzustand der (Neu-)Verteilung geeigneter Habitate unter einem hypothetischen zukünftigen, stabilen Klimaregime ab. Mittelfristig ist daher vielmehr damit zu rechnen, dass die Vegetation höherer Lagen sich mit nachrückenden Arten mit höherem Wärmeanspruch anreichert, während viele Vertreter der kälte-adaptierten Flora diese Standorte

noch längere Zeit besetzt halten werden. Eine solche Anreicherung wurde in Studien festgestellt, welche die Reaktion von Hochgebirgsvegetation auf die klimatischen Trends der letzten Jahrzehnte untersucht haben (Pauli et al., 2012). Längerfristig wird durch den Abtrag der entstehenden „Aussterbeschuld" (Jackson und Saxon, 2010) die Biodiversitätsbilanz der höheren Gebirgslagen aber vermutlich deutlich weniger positiv ausfallen.

Wiederholungsuntersuchungen in den Alpen und in Nordeuropa bestätigen bisher die in Modellstudien prognostizierte Artenanreicherung. Neukartierungen hoher Alpengipfel, deren Gefäßpflanzenbestand bereits im 19. oder im frühen 20. Jahrhundert erhoben wurde, zeigten eine starke Zunahme der Artenzahlen (Grabherr et al., 1994, 2001; Bahn und Körner, 2003; Holzinger et al., 2008; Vittoz et al., 2008). Ganz ähnliche Ergebnisse liegen für die Skanden (Klanderud und Birks, 2003; Kullman, 2010) und die schottischen Gebirge (Britton et al., 2009) vor. Die längste Beobachtungsreihe stammt vom Piz Linard in der Silvretta / Graubünden (1835 bis 2010), mit einer sukzessiven Zunahme von einer auf 16 Arten (Wipf et al., 2012). Auf erosionsbelasteten, schuttreichen Standorten stagnierte die Artenzahl (Gottfried et al., 1994), ebenso am touristisch stark frequentierten Piz Julier in Graubünden (Pauli et al., 2001). Im Allgemeinen scheint die Artenanreicherung innerhalb der letzten zwei bis drei Jahrzehnte jedoch rascher abzulaufen als vor den 1980er-Jahren (Walther et al., 2009). Vergleichsdaten von 1994 und 2004 der Art-Deckungen (d. h. Prozentsatz der Bodenoberfläche, die von Pflanzenbiomasse bedeckt wird) in Dauerbeobachtungsflächen am alpin-nivalen Übergangsbereich des Schrankogel (Stubaier Alpen, Tirol) zeigten aber erstmals auch deutliche Rückgänge: Alle nivalen Arten verloren an ihrer Untergrenze an Deckung und gleichzeitig erfolgte eine Zunahme von alpinen Rasenarten (Pauli et al., 2007). Diese gerichtete Veränderung lässt auf eine aktuelle Höherverschiebung des alpin-nivalen Ökotons schließen, die einer Höherverlagerung der sommerlichen Schneegrenze folgt (Gottfried et al., 2011).

Das Höhersteigen der Arten in alpinen Gipfelzonen ist ein europaweit nachweisbarer Prozess, der im Zeitraum 2001 bis 2008 allerdings zu unterschiedlichen Artenzahlveränderungen führte: überwiegend Zunahmen im borealen und temperaten Europa, Stagnation oder Abnahmen im mediterranen Süden des Kontinents (Pauli et al., 2012). Letzteres könnte insbesondere durch eine Kombination von Erwärmung und verringerter Wasserverfügbarkeit bedingt sein. Eine weitere paneuropäische Studie zeigt eine Anreicherung wärmeliebender bzw. einen Rückgang kälte-adaptierter Arten in alpinen Pflanzengesellschaften. Diese „Thermophilisierung" alpiner

Tabelle 3.5 Neun Moortypen und deren erwarteter Verlust unter Klimawandelbedingungen in Österreich. Quelle: verändert nach Essl et al. (2012)

Table 3.5 Nine mire types in Austria and projected loss under climate change conditions. Source: modified from Essl et al. (2012)

Moor-Typ	Erwarteter Verlust in % (2080 bis 2100)	
	B2 (+2.5 °C)	A1F1 (+4.4 °C)
saures Niedermoor	61	61
karbonatisches Niedermoor	6	6
alpines Niedermoor	79	76
Schwingmoor	86	75
Übergangsmoor	24	36
Hochmoor	60	72
Hochmoor mit Krummholz	58	65
degradiertes Hochmoor	97	100
Pioniergesellschaften auf Torf	9	10

Vegetation zeigt deutliche Unterschiede zwischen einzelnen Gebirgssystemen (Abbildung 3.12) und korreliert mit der regional variablen Frühsommer-Erwärmung von den 1990er- zu den 2000er-Jahren (Gottfried et al., 2012).

Die allgemeine Tendenz, mit zunehmender Erwärmung höherliegende Habitate zu erschließen gilt dementsprechend auch für Baumarten. In den Alpen waren bislang Nutzungsänderungen der wichtigste Faktor für die aktuell zu beobachtende Waldzunahme in Gebirgslagen. Nach den Ergebnissen der Österreichischen Waldinventur ist die fortschreitende Waldflächenzunahme in Seehöhen über 1 800 m am stärksten ausgeprägt. So entfielen von den über 31 000 ha Waldflächenzunahme zwischen 2000 und 2009 über 30 % auf diese hochsubalpinen Bereiche (Russ, 2011). Dies kann einerseits durch die Extensivierung der Bewirtschaftung von Almflächen, andererseits über günstigere Klimabedingungen erklärt werden. Nicolussi und Patzelt (2006) prädizieren bei einem Fortbestand der gegenwärtigen Temperaturverhältnisse einen Anstieg der Baum- bzw. Waldgrenze um etwa 100–150 Höhenmeter über jener zur Mitte des 19. Jahrhunderts. Untersuchungen von Dullinger et al. (2004) in den Nördlichen Kalkalpen scheinen diesen Trend zu bestätigen, doch wurden wesentlich langsamere Veränderungen der Waldgrenze (*Pinus mugo* [Legföhre] als Waldgrenzbaumart) festgestellt, die stark von der zwischenartlichen Konkurrenzsituation abhängen. So könnte sich unter den Verhältnissen des Klimawandels unter den Waldgrenzbaumarten die Fichte besser etablieren als ihre beiden Konkurrenten Legföhre und Lärche (Dullinger et al., 2005).

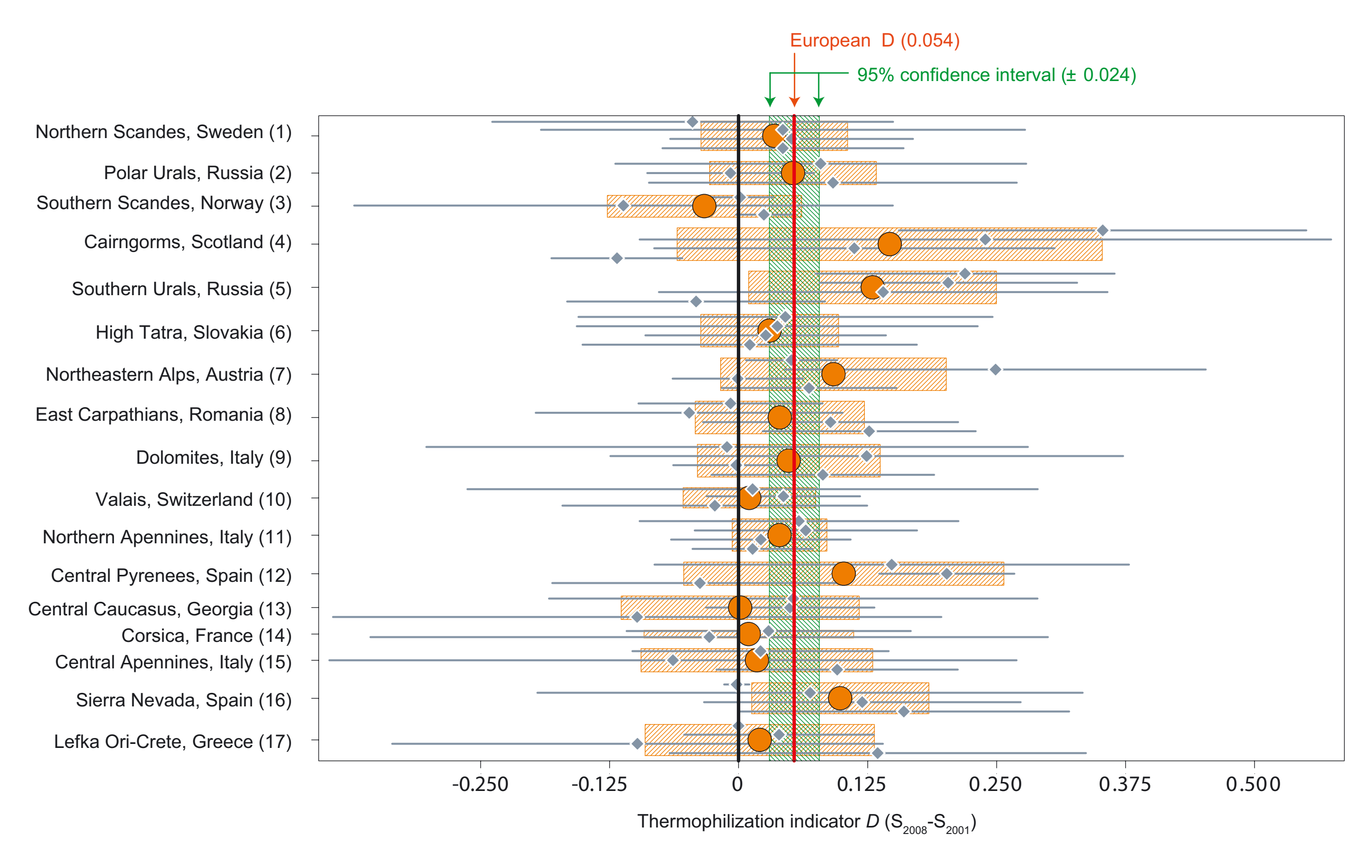


Abbildung 3.12 Die Thermophilisierung alpiner Gipfelvegetation in europäischen Hochgebirgen zwischen 2001 und 2008 (GLORIA-Beobachtungsgipfel). Der Thermophilisierungs-Indikator (*D*) zeigt die Veränderung der Artenzusammensetzung hinsichtlich wärmeliebender versus kälteadaptierter Arten. Positive *D*-Werte indizieren eine Deckungszunahme oder Einwanderung wärmeliebenderer Arten (die vorwiegend in tieferen Lagen vorkommen) und/oder einen Rückgang oder das Verschwinden von Arten, die vorwiegend in höheren Lagen vorkommen. Rauten und horizontale Linien: *D* und 95 %-Konfidenzintervalle für die einzelnen Beobachtungsgipfel, orange Kreise und horizontale Balken: *D* und 95 %-Konfidenzintervalle für Gebirgssysteme, rote Linien und vertikaler grüner Balken: europäisches *D* und 95 %-Konfidenzintervall, schwarze Linie: Referenzlinie bei $D = 0$. Quelle: Gottfried et al. (2012)

Figure 3.12 The thermophilisation of alpine summit vegetation in European high mountain systems between 2001 and 2008. The thermophilisation indicator (*D*) shows the change in species composition with respect to warm-demanding versus cold-adapted species. Positive values of *D* indicate an increase or immigration of warm-demanding species (which predominantly occur in lower elevations) and/or a decrease or disappearance of which usually occur in higher elevations. Diamonds and horizontal lines: *D* and 95 % confidence intervals for the summits, orange dots and horizontal bars: *D* and 95 % confidence intervals for the mountain regions, red line and green shading, European D and its 95 % confidence interval, black line, reference line at $D = 0$. Source: Gottfried et al. (2012)

In der Schweiz fanden nur 4 % der Zunahme oberhalb des natürlichen[2] Baumgrenz-Ökotons statt (Gehrig-Fasel et al., 2007). In einigen anderen Hochgebirgen (Ural, Rocky Mountains / SW-Yukon) konnte aber bereits ein massives Höhersteigen der natürlichen Baumgrenze beobachtet werden (Moiseev und Shiyatov, 2003; Danby und Hik, 2007; Kammer et al., 2009). Im aktuellen IPCC-Sachstandsbericht (IPCC, 2014) wird dieser Trend auch für europäische Gebirgshabitate beschrieben. Speziell in stark fragmentierten alpinen Lebensräumen mit einem hohen Anteil endemischer Arten, im Mediterrangebiet, aber auch in den niedrigeren Randketten der Alpen (Pauli et al., 2003; Essl et al., 2009; Dirnböck et al., 2011) wirkt sich eine fortschreitende Thermophilisierung und Verwaldung alpiner Habitate wegen der geringen Höhenerstreckung der alpinen Stufe auf die Verbreitung von subalpinen, alpinen und nivalen Pflanzengesellschaften negativ aus.

3.3.4 Wälder

Die mit Nadelhölzern bestockte Fläche hat laut Österreichischer Waldinventur 2007 / 09 seit der letzten Erhebungsperiode 2000 / 2002 um rund 116 000 ha abgenommen. Vor allem

[2] www.gloria.ac.at

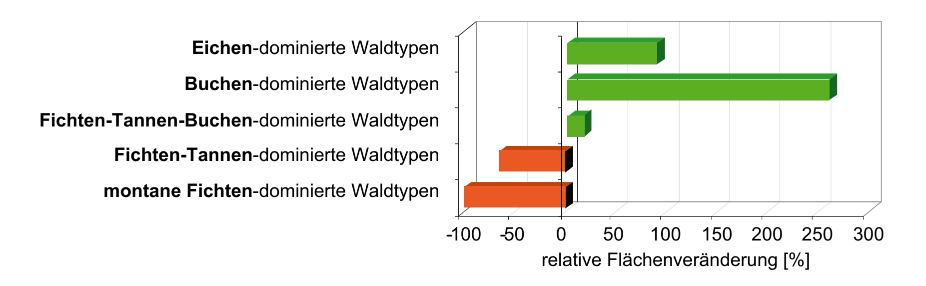


Abbildung 3.13 Mit einem dynamischen Ökosystemmodell simulierte relative Veränderung wichtiger potentiell natürlicher Waldtypen (d.h. PNV) auf Erhebungspunkten der Österreichischen Waldinventur unter einem Klimaänderungsszenario (+2 °C, −15 % Sommerniederschlag). Quelle: Lexer (2001)

Figure 3.13 Relative changes in area shares of selected potential natural vegetation types (i.e. PNV) at plots of the Austrian Forest Inventory as simulated with a dynamic forest ecosystem model. Climate change scenario: +2 °C mean annual temperature, −15 % summer precipitation). Source: Lexer (2011)

die Fichte hat im Vergleich zur Vorperiode über 100 000 ha an Fläche verloren, ein Grund dafür sind die Windwurfkatastrophen 2007 und 2008. Aber auch die mit Weißkiefer bestockte Fläche ist um rund 14 000 ha zurückgegangen. Damit einher geht eine Zunahme der Laubholzflächenanteile. Aktive Maßnahmen in der Waldbewirtschaftung bzw. deren Unterlassung sind jedoch der bei weitem wichtigste Grund für diese beobachteten Veränderungen. Da der überwiegende Teil der Waldfläche in Österreich bewirtschaftet wird, ist der Anteil klimwandelabhängiger Ursachen schwierig zu quantifizieren. Teil der oben angesprochenen Bewirtschaftungsmaßnahmen können z. B. als Anpassungsmaßnahme an einen Klimawandel interpretiert werden (vgl. Band 3, Kapitel 2).

Für die Schweiz und für Österreich liegen Simulationsstudien vor, die davon ausgehen, dass artenreiche Laubwaldtypen ihr potentielles Areal im Klimawandel vergrößern werden (Kienast et al., 1998; Lexer et al., 2002). In Österreich würde es demzufolge bei einer Klimaerwärmung von 2 °C und geringfügig reduziertem Niederschlag auf knapp 80 % der Waldfläche zu einer Veränderung der potentiell natürlichen Waldgesellschaft kommen, wobei vor allem Buchen-, aber auch Eichen- und Buchen-Tannen-Fichtenwaldtypen ihren Flächenanteil erhöhen würden (Abbildung 3.13). Ähnliche Einschätzungen liegen aus Slowenien vor (Kajfež-Bogataj, 1999). Courbaud et al. (2010) weisen am Beispiel der französischen Alpenwälder darauf hin, dass durch die starke Heterogenität der Gebirgswaldstandorte die Abschätzung, wie sich natürliche Waldtypen verändern würden, extrem schwierig ist.

Eine Klimaveränderung wird sich allerdings nicht in allen Regionen und selbst innerhalb von Regionen nicht auf allen Standorten gleich auswirken, sondern in Abhängigkeit des heutigen Ausgangszustands in Bezug auf Klima und Waldaufbau unterschiedliche Effekte bewirken. Theurillat und Guisan (2001) schließen etwa auf Basis einer umfassenden Literaturrecherche, dass in den Alpen die Waldökosysteme eine Temperaturerhöhung von 1–2 °C im Allgemeinen tolerieren könnten, ohne dass wesentliche Arealveränderungen von aktuell bestehenden Waldtypen ausgelöst würden. Basierend auf Simulationsstudien sahen Lexer et al. (2002) diesen Schwellenwert in Bezug auf Temperaturerhöhungen bei etwa +1 °C.

Die Annahmen, die zur Simulation der potentiell natürlichen Vegetation (PNV) zusätzlich getroffen werden müssen sowie die bestehenden Wissenslücken etwa bei Verjüngungsprozessen, führen zu beträchtlichen Einschränkungen in der direkten Verwertbarkeit der so generierten „zukünftigen“ PNV als Planungsgrundlage in der praktischen Waldbewirtschaftung. Außerdem muss berücksichtigt werden, dass eine Voraussetzung zur Simulation eines „Gleichgewichtszustandes zwischen Standort und Vegetation“ (d. h. PNV) ein konstant stabiles Klima ist. Sämtliche verfügbaren Klimaänderungsszenarien enden jedoch im Jahr 2100 mit sich fortsetzendem Erwärmungstrend. Damit entspricht die Verwendung eines „Gleichgewichtszustandes“ bei fortgesetztem Klimawandel nach 90 Jahren nicht einmal einem durchschnittlichen heutigen Umtrieb von Fichte oder Kiefer. Schließlich werden auch heute durchaus erfolgreich Baumarten, die nicht in der (heutigen) PNV vertreten sind, auf großen Flächen außerhalb ihrer „natürlichen“ Nische in Wäldern mit prioritärer Produktionsfunktion favorisiert. Es ist selbstredend, dass potentiell interessante gebietsfremde Baumarten wie Douglasie oder Roteiche, die nicht der heimischen Flora angehören, im traditionellen PNV-Ansatz nicht berücksichtigt werden.

Der PNV-Ansatz ermöglicht die Analyse der Veränderung von ökologischen Potentialzuständen unter Klimawandeleinwirkung, ist aber nicht geeignet für die Analyse tatsächlich ablaufender kurz- bis mittelfristiger Klimawandeleffekte auf

Box 3.8: Intensivierung von Störungsregimen: Ist der Klimawandel schuld?
Box 3.8: Intensification of disturbance regimes: Is climate change to blame?

Waldschäden durch Wind und Borkenkäfer haben in Europa in den letzten Jahrzehnten deutlich zugenommen (Schelhaas et al., 2003). In Österreich wurden in den Jahren 2002 bis 2010 im Durchschnitt 3,1 bzw. 2,2 Mio. m³ durch Wind und Borkenkäfer geschädigt, was dem zwei- bis neunfachen der Periode 1961 bis 1990 entspricht (Tomizcek et al., 2011). Klimafaktoren haben einen bedeutenden Einfluss auf Störungsprozesse: So treten z.B. Sturmereignisse in Österreich vor allem im Winter auf, wo eine Abnahme des Bodenfrosts die Baumstabilität negativ beeinflussen kann. Borkenkäferschäden sind sowohl von der Insektenpopulation als auch vom Abwehrvermögen der Bäume abhängig, wobei erstere durch Erwärmung ansteigt, während z. B. Trockenstress letztere verringert. Der bereits stattgefundene Klimawandel hat über derartige Prozesse bereits signifikant zum Ansteigen von Waldschäden in Österreich und Europa beigetragen (Seidl et al., 2011a; siehe auch Box 5).

Störungen werden jedoch auch von Waldaufbau und -zusammensetzung stark beeinflußt. Sowohl die forstwirtschaftlichen Erfolge der letzten Jahrzehnte – steigende Waldfläche und Waldvorrat in Österreich – als auch die waldbaulichen Fehler vergangener Jahrzehnte (z. B. der Anbau von Fichtenbeständen weit außerhalb ihres natürlichen Verbreitungsgebietes) haben zu einem Ansteigen der Waldschäden durch Störungen beigetragen – in Österreich ist dieser Effekt sogar stärker als jener des Klimawandels (Seidl et al., 2011a). Sowohl Klimawandel als auch Waldbewirtschaftung haben also zu einer europaweiten Intensivierung der Störungsregimes beigetragen.

Für die Zukunft kann erwartet werden, dass sich dieser Trend weiter fortsetzt, da sich das Klima weiter erwärmen wird und die Waldstruktur und -zusammensetzung nur sehr langfristig veränderbar ist. Für Borkenkäferschäden konnte z.B. anhand eines regionalisierten Klimawandelszenarios gezeigt werden, dass eine moderate Erwärmung von +2.4 °C zu einer Vervierfachung der Borkenkäferschäden in Österreich führen könnte (Seidl et al., 2009a). Hierzu tragen sowohl zunehmende Käferpopulationen als auch abnehmende Wirtsfitness bei, wobei die relativ größten Anstiege für höher gelegene Gebiete simuliert wurden, wo große, bisher aufgrund zu geringer Temperaturen nicht für den Käfer geeignete, Nadelholzpopulationen durch den Klimawandel zunehmend geschädigt werden (siehe auch Marini et al., 2012). Wie schon für die historische Schadentwicklung dokumentiert, kann durch Waldbewirtschaftung die Schadanfälligkeit maßgeblich beeinflusst werden (Seidl et al., 2008), wobei bedacht werden muss, dass waldbauliche Maßnahmen lange Vorlaufzeiten haben und zukünftige robuste Waldzustände schon heute begründet werden müssen.

Vegetationsstruktur und -zusammensetzung und kann auch keine Bewirtschaftungseffekte integrieren. Analysen mit dynamischen Waldökosystemmodellen, die sowohl Klima- als auch Bewirtschaftungseffekte abbilden können, erlauben hingegen eine direkte Beurteilung von Klimaänderungseffekten auf Waldökosystemstruktur und -funktionsweise. Seidl et al. (2011a) analysierten 160 000 ha Wirtschaftswald der Österreichischen Bundesforste und kamen zum Schluss, dass bei Fortführung des derzeitigen Bewirtschaftungskonzeptes knapp 40 % dieser Waldflächen in der 2. Hälfte des 21. Jahrhunderts als hoch vulnerabel in Bezug auf die weitere Erbringung von Ökosystemleistungen einzuschätzen sind. Primär dafür verantwortliche Wirkungsketten sind steigende Schäden durch Störungen (vgl. hierzu Box 3.5 zu Borkenkäfern, sowie Box 3.8 und 3.9) und negative Zuwachstrends, vor allem auf physiologisch flachgründigen Kalkstandorten.

3.3.5 Grünland

Abgrenzung und Charakterisierung

Das typische anthropogen bestimmte Dauergrünland besteht aus einer Anzahl unterschiedlicher Pflanzenarten, wobei hier aus Sicht der landwirtschaftlichen Nutzung die Artengruppen der Gräser, der Leguminosen und der Kräuter von besonderer Bedeutung sind. Dauergrünland wird im Verbund mit Wiederkäuerhaltung (Rinder, Schafe) betrieben und ist durch einen relativ höheren spezifischen Wasserbedarf für die pflanzliche Biomasseproduktion gekennzeichnet als die meisten Ackerkulturen. Dies liegt daran, dass die jeweils am besten für eine intensive Futternutzung geeigneten Artenzusammensetzungen (also jene mit einer insgesamt hohen Biomasseleistung bei gleichzeitig hoher Futterqualität) an niederschlags-

Box 3.9: Misteln – Gewinner des Klimawandels auf Kosten ihrer Wirtsbäume?
Box 3.9: Mistletoes – winners of climate change at host plant expense?

Die Gemeine Mistel (*Viscum album*) ist ein Halbparasit (d. h. sie entzieht ihren Wirtspflanzen Nährstoffe, kann aber selbst Photosynthese betreiben) an einer Vielzahl von Baumarten und schädigt diese durch den Entzug von Wasser und Mineralnährstoffen (Nierhaus-Wunderwald und Lawrenz, 1997; Butin, 2011). Sie wird in drei wirtsspezifische Unterarten unterteilt: Die Laubholzmistel (*Viscum album* ssp. *album*) befällt viele verschiedene Laubhölzer, die Tannenmistel (*V. album* ssp. *abietis*) die Weißtanne und die Kiefernmistel (*Viscum album* spp. *austriacum*), Weiß-, Schwarz- und Hakenkiefer und selten auch andere Nadelbäume (Nierhaus-Wunderwald und Lawrenz, 1997; Butin, 2011). Misteln haben hohe Licht- und Wärmeansprüche und es wird erwartet, dass sich aufgrund höherer Temperaturen ihre Verbreitungsgebiete erweitern und ihre Häufigkeit zunehmen werden (Kliejunas et al., 2009).

Im Schweizer Kanton Wallis kam die Kiefernmistel am Beginn des 20. Jahrhunderts nur selten über 1 000 m Seehöhe vor, bei einer systematischen Erhebung 2002 / 03 wurde aber auch über 1 000 m starker Mistel-Befall an Weißkiefern festgestellt (Hilker et al., 2005; Rigling et al., 2006). Obwohl der Anteil der Probeflächen mit Misteln und die Intensität des Befalls in tieferen Lagen höher waren, trat die Kiefernmistel auch noch in 1 250 m Seehöhe auf der Hälfte der Untersuchungsflächen auf. Die höchste Fundstelle befand sich auf knapp 1 500 m (Hilker et al., 2005). Für das Wallis konnte somit eine Erhöhung der Verbreitungsgrenze während des letzten Jahrhunderts um 200–250, an manchen Orten sogar um rund 300 Höhenmeter, dokumentiert werden (Hilker et al., 2005). Mithilfe eines statistischen Regressionsmodells konnte die Höhenverschiebung des Mistelvorkommens durch einen gleichzeitigen Anstieg der Winter- und Frühjahrstemperaturen erklärt werden (Dobbertin et al., 2005; Hilker et al., 2005; Rigling et al., 2006). Auch die Erhöhung der Befallsintensität von Misteln an Kiefern steht vermutlich in Zusammenhang mit wärmeren Temperaturen, und der Halbparasit ist auch ein wichtiger Faktor bei dem im Wallis beobachteten Weißkiefernsterben, das durch einen abiotisch-biotischen Schädigungskomplex verursacht wird (Dobbertin und Rigling, 2006; Rigling et al., 2006).

Kiefern- und Tannenmistel sind in Österreich gebietsweise wichtige Schädigungsfaktoren an ihren Wirtsbaumarten, meist in lichten Waldbeständen auf trocknen Standorten (Cech und Perny, 1998; Krehan und Cech, 1998). In talnahen Waldkiefernwäldern nördlich des Inns in Tirol wird seit 25 bis 30 Jahren eine Zunahme des Befalls durch die Kiefernmistel beobachtet (Cech und Perny, 1998). Ähnlich wie in der Schweiz ist zu erwarten, dass sich aufgrund einer Klimaerwärmung die Verbreitungsgebiete von Misteln ausdehnen sowie die Befallsintensität und ihre Bedeutung als Schädigungs- und Störungsfaktor zunehmen werden. Erhöhte Absterberaten von Mistel-befallenen Bäumen wurden nach Trockenperioden beobachtet (Dobbertin und Rigling, 2006; Rigling et al., 2006).





Box 3.9 Abbildung 1 Befall der Gemeinen Mistel an Weißtanne (Bild links) und an Weißkiefer (Bilder Mitte und rechts) in Niederösterreich
Box 3.9 Figure 1 Common mistletoe on Silver fir (left) and on Scots pine (center, right) in Lower Austria

reichere Verhältnisse angepasst sind (sogenannte „Fettwiesen") und somit Wasser weniger effizient nutzen. Der pflanzliche Wasserbedarf im intensiv genutzten Grünland (mehr als drei Schnitte / Jahr) beträgt ca. 600–900 l / kg gebildeter Trockensubstanz, also ca. das Doppelte von Getreide. Andererseits ist aber der unproduktive Wasserverlust durch Bodenevaporation aufgrund der ständigen, ganzjährigen Bodenbedeckung geringer als im Ackerbau. Dies dürfte durch Interzeptionsverluste (d. h. Verdunstung von benetzten Pflanzenoberflächen), die bei geschlossenen Pflanzenbeständen im Mittel ca. 20 % des Niederschlags betragen, zum Teil wieder kompensiert werden. Dauergrünland ist über die gesamte Vegetationsperiode im Wachstum wobei sich eine möglichst gleichmäßige Niederschlagsverteilung günstig auf die Biomasseproduktion auswirkt. Eine rentable Grünlandproduktion ist auf eine dauerhafte Erhaltung eines produktiven und leistungsfähigen Pflanzenbestandes ausgerichtet und braucht während der Sommermonate ausreichend und regelmäßigen Niederschlag (mind. 500–600 mm von April bis September).

Klimawandelfolgen in Österreich

Das landwirtschaftliche Grünlandproduktionspotenzial dürfte durch eine Klimaerwärmung insbesondere in den heute schon trockeneren Grünlandgebieten (mittlere Jahresniederschläge unter ca. 800 mm) durch zunehmenden Trocken- und Hitzestress zurückgehen. Regional kann dieses Bild durch die Temperaturverhältnisse, die saisonale Niederschlagsverteilung, die Bodeneigenschaften (Nährstoff- und Wasserspeichervermögen) und die Produktionstechnik (Schnitthäufigkeit, Art und Höhe der Düngung usw.), welche das Produktionspotenzial wesentlich mitbestimmen, entsprechend differenziert sein.

Am Ostalpenrand ist in den Übergangsregionen von Grünland und Ackerbau mit sinkendem Produktionspotenzial zu rechnen, da sich unter den meisten Klimaänderungsszenarien im Osten Österreichs in den nächsten Jahrzehnten eher Niederschlagsabnahmen bei deutlich wärmeren Temperaturen abzeichnen. Nördlich der Alpen ist unter gegenwärtigen Klimabedingungen generell die zunehmende Entfernung zum Alpenrand mit abnehmenden Niederschlägen verbunden, was sich in geringerem Produktionspotenzial und höherem Ertragsrisiko äußert. In diesen Gebieten dürfte sich das Produktionspotenzial von Grünland weiter verschlechtern. Zusätzlich werden vor allem Grünlandregionen mit Böden welche geringes Wasserspeichervermögen aufweisen relativ stärker betroffen sein. Nach Eitzinger et al. (2009c) zählen dazu das böhmische Massiv bzw. weite Teile Nordösterreichs und der angrenzenden Regionen Tschechiens (Abbildung 3.14).

Die Auswirkungen der klimatischen Verhältnisse des Jahres 2003 haben erkennen lassen, dass beim Auftreten von trockeneren Sommern das Schadensausmaß im Grünland beträchtlich sein kann (Zarzer, 2004). Dieser empirische Befund wird durch neue agroklimatische Studien (z. B. Eitzinger et al., 2009a; Schaumberger, 2012) bestätigt.

In Gunstlagen mit deutlich höheren Niederschlägen (mit über 800 mm Jahresniederschlag) würde durch die höheren Temperaturen das Produktionspotenzial ansteigen. In höheren Lagen, wo aktuell vor allem die Temperatur und die Länge der Wachstumsperiode begrenzend wirken, dürfte dieser Effekt stärker ausfallen, wenngleich kleinräumig durch die Exposition (Hangneigung und -ausrichtung) große Unterschiede gegeben sein können.

In den alpinen und subalpinen Lagen hat insbesondere die Dauer der Schneedecke im Frühjahr einen großen Einfluss auf die potenzielle Länge der Wachstumsperiode des Grünlandes und auf das Ertragspotenzial. Aus Schweizer Simulationsstudien (Calanca et al., 2005) ist bekannt, dass sich bei einer mittleren Temperaturzunahme um ca. 3 °C (entspricht dem Zeitfenster von 2071 bis 2100 in vielen Klimaänderungsszenarien) die Wachstumsperiode des Grünlandes in den mittleren und tiefen Lagen um 30 bis 40 Tage verlängern könnte, womit ein zusätzlicher Schnitt im Jahr möglich wäre. In den höheren Lagen würde es zu einer um 5 bis 8 Wochen früheren Ausaperung im Frühling und zu einer entsprechend früheren Bewirtschaftung kommen (Jasper et al., 2004). Da aber gleichzeitig unter den Klimaänderungsszenarien in Mitteleuropa zunehmende Winterniederschläge erwartet werden, könnte die im Frühjahr nötige Bewirtschaftung des Grünlandes und die Futterkonservierung insbesondere des ersten Schnittes in den niederschlagsreichen Bergregionen erschwert werden. Die in den Klimaszenarien durchwegs auftretende Abnahme der Sommer- und Frühherbstniederschläge dürfte die Erntebedingungen und arbeitswirtschaftlichen Bedingungen im übrigen Jahr im Grünland verbessern.

Höhere Wintertemperaturen können allerdings auch Schadfaktoren für das Grünland fördern. Hierzu zählen zum Beispiel Wechselfröste (Auffrieren und Austrocknen der Pflanzen), vorübergehende Wärmephasen (Frostenthärtung und Reservestoffverbrauch), undurchlässige Schneedecken mit Eisauflage wegen vermehrter Tauphasen (Schneeschimmel) und Spätfröste (Schädigung frühreifer Arten / Sorten), wobei die regionalen Auswirkungen bisher kaum abzuschätzen sind (Diepolder, 2007).

Durch klimatische Verschiebungen sind Änderungen in der Artenzusammensetzung des Dauergrünlands zu erwarten, da weiter zunehmende Trockenheit tendenziell die Bewirtschaf-

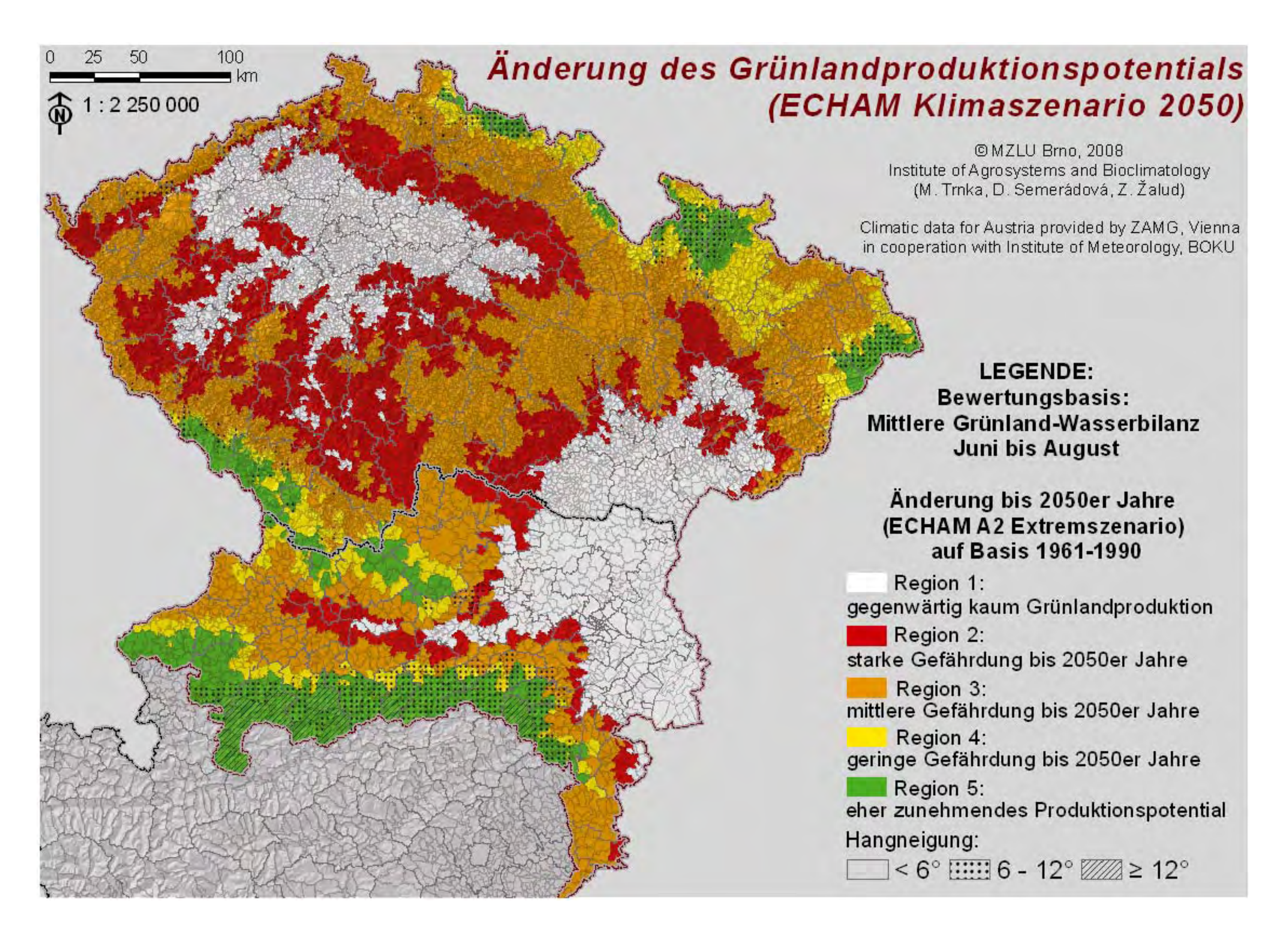


Abbildung 3.14 Die unter dem HadCM A2 Klimaänderungsszenario für 2050 negativ betroffenen Grünlandregionen nördlich der Alpen (in rot). Zugrundeliegende Klimasignale im Vergleich zur Bezugsperiode 1961 bis 1990: Temperatur +2,7 °C (Oktober bis April), +3,8 °C (Mai bis September); Niederschlag +7.1 % (Oktober bis April), +23,8 % (Mai bis September). Ursache ist eine zunehmend schlechtere Wasserbilanz im Sommer und damit sinkendes Produktionspotential bzw. deutlich höheres Ertragsrisiko. Quelle: Eitzinger et al. (2009c) verändert

Figure 3.14 Negative impacts on meadows north of the Alps (red) under climate change conditions in 2050 (temperature: +2.7 °C (October to April), +3.8 °C (May to September); precipitation: +7.1 % (October to April), +23.8 % (May to September) compared to the period from 1961 to 1990. Source: modified from Eitzinger et al. (2009c)

tung eher unerwünschte Arten mit meist niedrigerer Futterqualität und niedrigerem Ertragspotenzial fördert (Verschiebung der Artenzusammensetzung von einer „Fettwiese“ hin zu „Trockenrasen“).

Insgesamt bewirkt eine intensivere Nutzung eine geringere Wurzelmasse und eine Dominanz der feuchteliebenden Fettwiesenarten, was insgesamt und zusätzlich in Kombination mit einem höheren Flächenertrag einen deutlich höheren Wasserbedarf im Vergleich zu extensiv genutztem Grünland ergibt. Bezüglich der Gefährdung durch Trockenheit ist daher mehrschnittiges, intensiv genutztes Grünland als empfindlicher einzustufen als extensiv genutztes Grünland (Karrer et al., 2010). Trockenschäden im Grünland, die mehrere Jahre nachwirken können, verursachen unter anderem Lücken in der Grasnarbe, welche Nachsaaten oder Neueinsaaten erforderlich machen oder die Verunkrautung mit Wurzelunkräutern fördern können.

Im Grünland ist, so wie bei vielen Ackerkulturen, bei verdoppeltem Kohlendioxidgehalt der Luft eine Zunahme der Biomasseleistung um ca. 10–20 % zu erwarten. Es ist derzeit weitgehend unklar, in welchem Ausmaß diese Effekte sich im Grünland langfristig manifestieren, da es Wechselwirkungen mit vielen Umweltfaktoren und vor allem zahlreiche Anzeichen langfristiger Anpassungen (Akklimatisierungseffekte) gibt (Kammann et al., 2005).

Als Folge des steigenden CO_2-Gehaltes der Atmosphäre werden Änderungen in der Bestandesarten-Zusammensetzung erwartet, wie etwa die Förderung der Leguminosen (Nösberger und Lüscher, 1995; Pötsch, 1998) und damit höhere N-Fixierungsraten des Pflanzenbestandes, wodurch andere Nährstoffe

wie Phosphor eine zunehmende ertrags- und qualitätsbestimmende Rolle erhalten können (Diepolder, 2007). Ein steigender Kohlendioxidgehalt der Luft hat, so wie beim Getreide nachgewiesen, Auswirkungen auf die Inhaltsstoffbildung bei Pflanzen, wie etwa die Eiweißbildung und die Eiweißqualität (Veränderung des C:N-Verhältnisses in der Biomasse durch Zunahme des Kohlenstoffanteils). Die Stickstoffdüngung und eine mögliche Ausbreitung der Leguminosen im Grünland könnten den erwarteten Eiweißabfall nicht fixierender Arten aber auch kompensieren (Diepolder, 2007).

Für das Grünland bedeutende Schädlinge (vorwiegend Insekten; Kreuter, 2007), wie zum Beispiel Engerlinge, könnten wegen höherer Bodentemperaturen regional verstärkt auftreten und Schäden in der Futterproduktion verursachen. Aus der Praxis wird zum Beispiel berichtet, dass zunehmend mehrere Generationen nebeneinander auftreten und mehrere Arten beteiligt sind (Maikäfer, Gartenlaubkäfer, Junikäfer), allerdings mit stark regionalen Unterschieden. Neben Ertragseinbußen bewirken Engerlinge durch Grasnarbenschädigung auch eine Zunahme des Erosionsrisikos.

Durch zunehmend mildere Herbst- und Winterwitterung können verschiedene Gräserkrankheiten, wie Rostpilze, gefördert werden (Diepolder, 2007). Langandauernde Schneedecken können aufgrund von Eiskrustenbildungen durch Tauphasen zum Beispiel den Schneeschimmel, eine nicht nur im Grünland verbreitete Pilzkrankheit, fördern. Ein positiver Effekt auf die Grünlandwirtschaft dürften die besseren Erntebedingungen im Sommer sein, da sich unter den Klimaszenarien durchgehend zunehmende Sommertrockenheiten und eine niedrigere Luftfeuchte abzeichnen (mit hohen Unsicherheiten wegen der großen Variationen in den regionalen Niederschlagsszenarien). Dies ist nicht nur für die Bodenbefahrbarkeit sondern insbesondere für eine schnellere und günstige Anwelkung zur Silageproduktion bzw. Feldtrocknung zur Heugewinnung von Vorteil, was im Mittel die Qualität des Erntegutes wesentlich verbessern würde. Andererseits könnte eine zu schnelle Bodenabtrocknung durch hohe Temperaturen insbesondere bei Silierverfahren zusätzliche Probleme schaffen (zum Beispiel Hemmung der erwünschten Milchsäuregärung, schwierigere Verdichtung des Erntegutes, Entwicklung von Schimmelpilzen). Insgesamt gesehen sind die Einflüsse des Klimawandels auf das Grünland von sehr komplexer Natur, vor allem aufgrund der unterschiedlichen und standortvariablen Grünlandartenzusammensetzung und der komplexen Interaktionen zwischen Biozönose, Standort und Bewirtschaftungsaktivitäten.

3.3.6 Gewässer

Allgemeines

Wärmere Wassertemperaturen verursachen steigenden Stoffwechsel der aquatischen Organismen, von Primärproduzenten bis zu Fischen. Aquatische Primärproduzenten synthetisieren essentielle Nährstoffe, die positiv auf Wachstum, Reproduktion und Überleben von Konsumenten wirken. Für die heimische Makrophytenvegetation sind Gefährdungen vor allem in stehenden und langsam fließenden Gewässern oder Gewässerabschnitten gegeben (Janauer et al., 2003). Viele der neuen Arten haben starke Auswirkungen auf das befallene Gewässersystem, besonders aber auf die vorher dort wachsenden Wasserpflanzen. Daraus kann eine Gefährdung der heimischen Biodiversität mit Auswirkungen auf die Fisch und Wirbellosen-Zönosen sowie die Sportfischerei entstehen. Spezifische Auswirkungen auf Hydrologie und Abflussverhalten werden in Band 2, Kapitel 2 behandelt.

Als Folge der Temperaturzunahme ist ein Vordringen wärmeliebender aquatischer Makrophyten (Wasserpflanzen) zu erwarten. Die Verbreitung erfolgt dabei vorwiegend entlang der Donau, wobei sich thermophile Arten aus dem unteren Donauraum flussaufwärts und Arten aus dem atlantischen Bereich über den Rhein-Main-Donau-Kanal flussabwärts ausbreiten und von dort in die Seen gelangen. Diese Ausbreitung erfolgt aktiv durch Wanderungen bzw. passiv durch den Transport mit Schiffen. Wärmere Wassertemperaturen können für kälteliebende Arten limitierend werden, wenn art- und stadienspezifische physiologische Temperaturgrenzen überschritten werden. Dies kann zu einer Verschiebung des Artenspektrums von kälte- zu wärmeliebenden Arten führen.

Fließgewässer

Fließgewässer lassen sich von der Quelle bis zur Mündung in Fischregionen gliedern und die Fischlebensgemeinschaften anhand des Fischregionsindex (Schmutz et al., 2000) beschreiben. Dieser Index kann jeden Wert zwischen 1 und 7 annehmen (siehe Tabelle 3.6). Die Fischregionen werden durch eine Vielzahl von abiotischen Kenngrößen wie Abfluss und Wassertemperatur geprägt.

Veränderungen des Abflusses in Österreich fanden bislang nur in geringem Ausmaß statt und sind meist nicht auf klimabedingte, sondern auf andere Ursachen wie Kraftwerksnutzung zurückzuführen. Österreichweite Prognosen deuten auf saisonale Änderungen, aber auf keine wesentlichen Veränderungen in der Wasserbilanz hin (Holzmann et al., 2010).

Tabelle 3.6 Fischregionen in Österreich
Table 3.6 Fish regions in Austria

Regionsindex	Fischregion
1	Quellregion
2	Untere Quellregion
3	Obere Forellenregion
4	Untere Forellenregion
5	Äschenregion
6	Barbenregion
7	Brachsenregion

Großräumige Folgewirkungen auf die Fließgewässerbiozönosen lassen sich daher derzeit nicht ableiten. In bestimmten Einzugsgebieten wurde aber in den letzten Jahrzehnten bereits eine signifikante Zunahme der sommerlichen Niederwasserperioden nachgewiesen, was zu verringerter Habitatverfügbarkeit führen kann (Hauer et al., 2012).

Anders als bei der Hydrologie verhält es sich mit der Wassertemperatur, die eng an die Lufttemperatur gekoppelt ist. Bereits in den letzten 100 Jahren ist eine Zunahme der Wassertemperatur in den Fließgewässern zu verzeichnen, wie dies anhand von Langzeitmessungen an der Donau ersichtlich wird (Abbildung 3.15). Die Jahresmitteltemperatur der Donau nahm in den letzten 100 Jahren um ca. 2 °C zu. Besonders stark war die Zunahme in den letzten 20 Jahren. Als Folge der Wassertemperaturveränderungen ist eine Verschiebung von kaltwasserliebenden hin zu warmwasserliebenden Arten und folglich eine Verschiebung der Fischregionen zu erwarten (siehe Abschnitt 3.2.10).

Die Erwärmung wird für die meisten kälteliebenden Fischarten eine Verschiebung ihrer Lebensräume gegen höhere Breiten und in größere Seehöhen bedeuten (Hari et al., 2006; Schmutz, 2008). Zugleich können kälteliebende durch wärmeliebende Arten verdrängt werden. Das bedeutet auch ein Zurückdrängen der Salmoniden. Einzelne Arten, wie z. B. die Äsche (*Thymallus thymallus*), sind lokal infolge anthropogener Eingriffe in ihrem Bestand schon derzeit so stark gefährdet, dass zusätzliche, klimabedingte Beeinträchtigungen sie an den Rand des Aussterbens bringen könnten. Es sind jedoch nicht nur einzelne Arten, sondern die gesamte Lebensgemeinschaft betroffen (Melcher et al., 2010; Schmutz und Mielach, 2011).

Stillgewässer

Die oberflächennahe Wassertemperatur von Seen in Österreich steigt derzeit um etwa 0,4–0,6 °C pro Dekade an (Dokulil, 2014). Im Tiefenwasser der Seen beträgt die Erwärmung etwa 0,1–0,2 °C pro Dekade (Dokulil et al. 2006; Abbildung 3.16; vergleiche auch Band 2, Kapitel 2). Diese Änderungen beeinflussen den trophischen Status von Seen ebenso wie deren Nahrungsketten und -netzwerke.

Im Hinblick auf die Biologie ermöglichen die höheren Temperaturen im Frühjahr einen früheren Wachstumsbeginn des Phytoplanktons. Gerten und Adrian (2000) konnten bereits eine Vorverlegung des Maximums im Frühjahr um einen Monat nachweisen. Die wichtigen Zooplankton Arten (Keratella, Bosmin und Daphnia) entwickelten sich ebenfalls zwei Wochen früher, was zu einem früheren Eintritt der sogenannten Klarwasserphase führte.

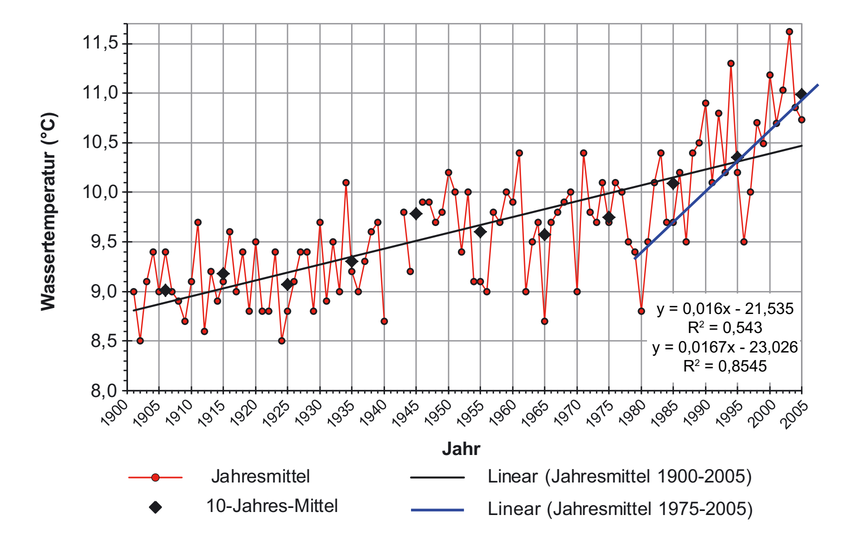


Abbildung 3.15 Langzeitmessung der Wassertemperatur der Donau. Datenquelle: Hydrographisches Zentralbüro

Figure 3.15 Longterm observations of water temperature in the River Danube in Austria. Source: Central Hydrographic Office

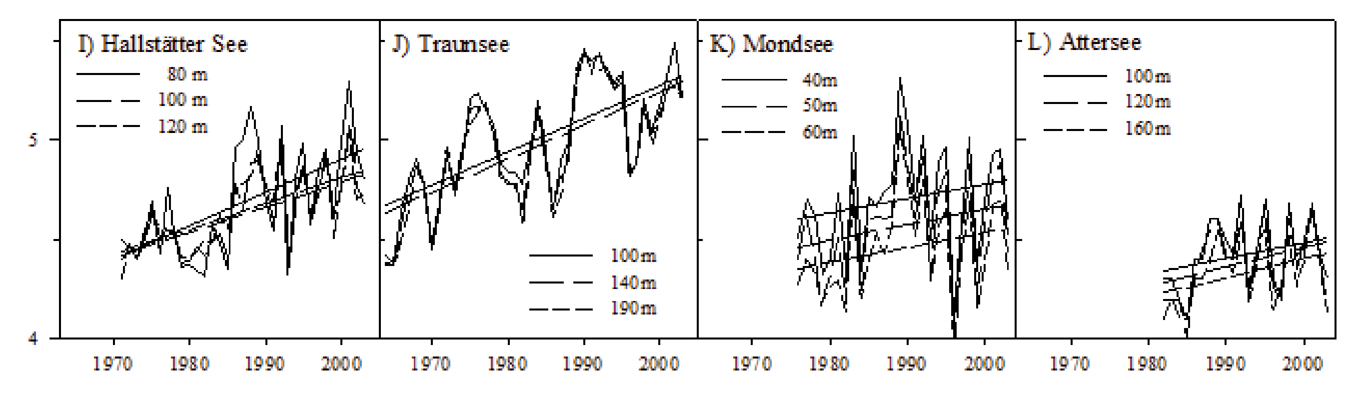


Abbildung 3.16 Langzeitmessung der Wassertemperaturen aus verschiedenen Tiefen ausgewählter Seen in Österreich. Nach Dokulil et al. (2006)

Figure 3.16 Longterm observations of water temperature in different depths of selected lakes in Austria. Adapted from Dokulil et al. (2006)

Als Folge der Temperaturzunahme ist ein Vordringen wärmeliebender aquatischer Vegetationselemente zu erwarten. Die Verbreitung erfolgt dabei vorwiegend entlang der Donau, wobei thermophile Elemente aus dem unteren Donauraum flussaufwärts vordringen und sich aus dem atlantischen Bereich Makrophyten (Wasserpflanzen) über den Rhein-Main-Donau-Kanal flussabwärts verbreiten und von dort in die Seen gelangen. Diese Ausbreitung erfolgt aktiv durch Wanderungen bzw. passiv durch Transport mit Schiffen.

Für die heimische Makrophytenvegetation sind Gefährdungen vor allem in stehenden und langsam fließenden Gewässer oder Gewässerabschnitten gegeben (Janauer et al., 2003). Viele der neuen Arten haben starke Auswirkungen auf das befallene Gewässersystem, besonders aber auf die vorher dort wachsenden Wasserpflanzen. Daraus kann eine Gefährdung der heimischen Biodiversität mit Auswirkungen auf die Fisch- und wirbellose Fauna sowie die Sportfischerei entstehen. Von einer Erwärmung der Oberflächengewässer sollten bei den Fischen jene Neozoen profitieren, die höhere Temperaturen bevorzugen, wie etwa der Graskarpfen (*Ctenopharyngodon idella*) oder der Sonnenbarsch (*Lepomis gibbosus*; vgl. Rabitsch et al., 2013).

3.4 Ökosystemleistungen
3.4 Ecosystem services

3.4.1 Definition und Abgrenzung

Die Betrachtung von Leistungen der Natur, die aufgrund ihres Nutzens für die Menschen zur Wohlfahrt beitragen (McVittie et al., 2013) hat in den letzten Jahren einen enormen Aufschwung genommen (Costanza et al., 1997). Die Vereinten Nationen prägten mit dem Millennium Assessment (MEA, 2005) den Begriff der „Ökosystemleistungen" („ecosystem services"). Nach dem „Millennium Ecosystem Assessment" lassen sich Ökosystemleistungen in vier Kategorien einteilen, wobei die sogenannten unterstützenden Leistungen (z. B. Erhaltung der genetischen Vielfalt) als Basis für die übrigen Leistungen angesehen werden: (i) Unterstützende Leistungen (Basisleistungen; Ökosystemleistungen, die auf Bodenbildung, Nährstoffkreislauf und Erhaltung der genetischen Vielfalt beruhen), (ii) Bereitstellende Leistungen (Bereitstellung von Nahrung, Wasser, Baumaterial – Holz, Fasern, Rohstoffe für Arzneimittel), (iii) Regulierende Leistungen (Regulierung von Klima, Überflutungen, Erosion, Rutschungen, Steinschlag, Krankheiten, Wasserqualität, Abfallbeseitigung, Bestäubung), und (iv) Kulturelle Leistungen (Ökosystemleistungen, die Erholung, Naturtourismus, ästhetisches Vergnügen und spirituelle Erfüllung fördern).

Der Begriff der Ökosystemleistungen muss von „Ökosystemfunktionen" unterschieden werden. Obwohl es terminologische Überschneidungen gibt, werden als Ökosystemfunktionen in der Regel die hinter den Ökosystemleistungen stehenden ökosystemaren Prozesse, seltener auch dahinterstehende ökosystemare Strukturen und Zustände bezeichnet. Die Unterschiede beruhen z. B. darauf, dass der Begriff der Ökosystemleistungen verschieden weit gefasst wird. Teilweise werden Ökosystemfunktionen und -prozesse als „Ökosystemleistung" gekennzeichnet, wohingegen in anderen Definitionen von einer strikten Trennung in ökosystemare Prozesse, Funktionen und Leistungen sowie in den daraus entstehenden Nutzen ausgegangen wird.

Derzeit ist mit dem CICES-Prozess (Common International Classification of Ecosystem Goods and Services) ein weiterer Versuch auf EU-Ebene im Gange, aufbauend auf MEA und TEEB (Haines-Young und Potschin, 2010) einen konsistenten Rahmen für die Analyse von Ökosystemleistungen zu schaffen. Letztendlich sollen Klassifikationssysteme die Grundlage für die Erfassung und Bewertung von „Naturleistungen" bilden. Im CICES werden jedoch, die Basisleistungen (supporting services; z. B. Photosynthese, Nährstoffkreislauf etc.) des MEA nicht angeführt, um Doppelzählungen zu vermeiden.

Im Rahmen des gegenständlichen Kapitels wird die vorhandene Literatur zu potentiellen Auswirkungen eines Klimawandels auf Ökosystemleistungen mit Bezug zu Österreich gesammelt und dargestellt. Im Sinne des MA wird die Erhaltung der Biodiversität als Voraussetzung für die Erbringung der anderen Ökosystemleistungen (bereitstellende, regulierende und kulturelle) betrachtet.

Es wird hier im Rahmen der bereitstellenden Ökosystemleistungen zwischen der Produktion von Holzbiomasse sowohl für materielle Zwecke als auch zur Energiegewinnung und der Produktion von Biomasse zu Ernährungszwecken unterschieden. Im Sinne von regulierenden Ökosystemleistungen werden die Speicherung von Kohlenstoff als Klimaschutzleistung, die Sicherung der Wasserschüttung bzw. der Grundwassernachlieferung und der Schutz vor gravitativen Naturgefahren betrachtet. Es wird darauf verweisen, dass dieses Kapitel keinen Gesamtüberblick zu Ökosystemleistungen in Österreich liefert und viele wichtige Ökosystemleistungen nicht berücksichtigt werden, da keine Information zu deren Beeinflussung durch den Klimawandel vorliegen.

Für Moore, Wälder, Grünland und Ackerflächen werden nachfolgend ausgewählte Ökosystemleistungen, zu denen wissenschaftliche Literatur vorhanden ist, in Bezug auf ihre Anfälligkeit gegenüber Phänomenen des Klimawandels zumeist qualitativ auf Basis von vorliegenden Detailstudien bzw. als Synthese verfügbarer Information beurteilt. Der Begriff der Vulnerabilität wird hier im Sinne von O´Brien et al. (2004) ohne die Miteinbeziehung von möglichen Anpassungsoptionen als summarische qualitative Bewertung der zu erwartenden Klimawandelauswirkungen verwendet (vgl. Abschnitt 3.1 und Band 2, Kapitel 1). Berücksichtigt werden dabei die Erzeugung von Nahrungs- und Futtermitteln, Holzbiomasse für materielle Verwendung sowie für energetische Zwecke (bereitstellend), die Speicherung von Kohlenstoff als Klimaschutzleistung, die Sicherung der Wasserschüttung bzw. der Grundwassernachlieferung und der Schutz vor gravitativen Naturgefahren (regulierend).

3.4.2 Moore

Moorgebiete stellen nicht nur spezielle Habitate dar, die eine Anzahl hochgradiger Spezialisten aus der Pflanzen- und Tierwelt beherbergen, sondern sind auch hocheffiziente Kohlenstoffspeicher mit über 150 t gespeichertem Kohlenstoff pro Hektar in dem obersten 50 cm Bodenhorizont. Waldböden haben im Durchschnitt nach Weiss et al. (2000) in Österreich etwa 119 t / ha Kohlenstoff gespeichert. Vor allem Hochmoore sind sensitiv auf wärmeres und niederschlagsärmeres Klima. In Österreich handelt es sich ca. um 4 000 ha solcher klimasensitiver Hochmoore. Niedermair et al. (2010) sehen 85 % der Hochmoore in Österreich bei Temperaturerhöhungen von 2–3 °C als gefährdet an. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen auch Essl et al. (2012; vgl. auch Tabelle 3.5).

Absolut gesehen ist die Relevanz dieser ökologisch bedeutsamen Ökosysteme als Kohlenstoffspeicher jedoch als eher gering einzustufen.

3.4.3 Wälder

Mit ca. 50 % der Fläche Österreichs ist die Relevanz von Waldökosystemen für die Erbringung von Ökosystemleistungen offensichtlich. Die Bedeutung einzelner Waldleistungen variiert örtlich stark und kann in einzelnen Regionen in Abhängigkeit von ökologischen Produktionsbedingungen oder der jeweiligen Regionalpolitik generell unterschiedlich sein (EEA, 2010). Tabelle 3.7 zeigt einen Überblick zu Waldleistungen und deren Beeinflussung durch Klimawandeleffekte.

Die Holzproduktion könnte einerseits von höheren Zuwächsen profitieren, doch wird es vor allem in jetzt schon trockenen inneralpinen Tallagen und auf seichtgründigen Standorten, die wenig Wasser speichern können, zu einem teilweisen Rückgang der Produktivität durch Trockenperioden und Hitzewellen kommen (Seidl et al., 2011b). Die Fichte wird in submontanen Höhenlagen auf großen Flächenanteilen als Hauptbaumart für eine geregelte Forstwirtschaft nicht mehr geeignet sein, da sich durch eine Klimaerwärmung in diesen Höhenlagen regelmäßig 2–3 Generationen Fichtenborkenkäfer pro Jahr entwickeln können (Seidl et al., 2008; Jönsson et al., 2011; siehe auch Box 3.5). Allgemein wird im heute nadelholzdominierten Bergwald durch die zunehmende Konkurrenzkraft von Laubhölzern, wie z. B. Buche und Bergahorn, die Baumartenvielfalt und damit der waldbauliche Entscheidungsspielraum bei der Baumartenwahl vergrößert. Der durchschnittliche Holzvorrat in den Alpenwäldern wird sich wahrscheinlich weiter erhöhen: Denn einerseits wird weniger Holz genutzt als zuwächst, andererseits steigt durch das Älterwerden

Tabelle 3.7 Qualitative Beurteilung der Vulnerabilität ausgewählter Ökosystemleistungen von Wäldern im Ostalpenraum. (+) nicht vulnerabel, (−) vulnerabel. Vor dem allgemeinen zeitlichen Horizont bis 2050, perspektivisch bis 2100. Die Aussagen basieren auf den gesamten Quellen die in vorangegangenen Kapiteln zu Arten und Ökosystemen verwendet wurden

Table 3.7 Qualitative judgement of vulnerability of selected forest ecosystem services in Austria. (+) not vulnerable, (−) vulnerable. Time horizone 2050. Longterm until 2100. Based on all sources used in previous chapters on species and ecosystems

Ökosystemleistung	Einschätzung der Vulnerabilität	
Holzproduktion	+(−)	auf großen Flächen Zunahme der Produktivität; lokal-regional durch großflächige Störungen und durch Trockenheit gefährdet; langfristig Erhöhung des Laubholzanteiles
Kohlenstoffspeicherung	+(−)	korrespondiert tw. mit Holzproduktion; Kohlenstoffpools im Waldboden könnten bei Erwärmung durch intensiveres Störungsregime zur CO_2-Quelle werden
Objektschutz	−	durch höhere Störungsfrequenz, häufigere und intensivere Niederschlagsereignisse vulnerabel; wichtig zur Aufrechterhaltung von Infrastruktur und Siedlungsräumen
Trinkwasserschutz	−	durch höhere Störungsfrequenz, häufigere und intensivere Niederschlagsereignisse raschere Humusabbauraten und Nitratauswaschung vulnerabel
Biodiversität	+/−	über der Waldgrenze Verdrängung artenreicher Grasvegetation durch das Höherwandern der Waldgrenze; die Baumartendiversität in der montanen Vegetationsstufe nimmt zu

der Waldbestände der Holzvorrat. Dieser weitere Anstieg des Holzvorrates hat möglicherweise negative Auswirkungen auf die Schadanfälligkeit durch Stürme, wodurch der Trend zu ansteigenden Vorräten sich in sein Gegenteil verkehren könnte.

Wälder mit Schutzfunktion (d. h. Wälder, welche entweder menschliche Einrichtungen und Bauwerke oder aber den Boden vor negativen Effekten durch gravitative Naturgefahren wie Lawinen, Steinschlag oder Erosion schützen) haben im Alpenraum eine besondere Relevanz. So geht etwa in der Schweiz das Bundesamt für Umwelt davon aus, dass zirka 40–60 % des Schweizer Waldes eine Schutzfunktion gegen Naturgefahren aufweisen (Wehrli et al., 2007). In den Bayerischen Alpen gelten gemäß Waldgesetz ungefähr 60 % des Waldes als Schutzwald, in Österreich sind etwa 31 % der gesamten Waldfläche prioritär mit einer Schutzfunktion belegt (Niese, 2011). In einzelnen alpinen Regionen liegt der Schutzwaldanteil höher, beispielsweise in Tirol mit mehr als 66 %. In den letzten Jahrzehnten hat die Bedeutung der Schutzfunktionalität zugenommen, weil Gebiete, die früher im Winter gemieden wurden, heute ganzjährig besiedelt sind oder eine bedeutende Rolle im Tourismus spielen.

Durch die klimawandelbedingt zu erwartende Intensivierung der Störungsregime wird auch zunehmend der Schutz vor gravitativen Naturgefahren betroffen sein und es werden vermehrt temporäre technische Schutzmaßnahmen wie Steinschlagnetze und Schneewerke erforderlich sein. Insgesamt werden die Anforderungen in Bezug auf stabile, ausreichend zahlreiche Dauerbestockungen gegen Steinschlag und Lawinenanbrüche sowie gutes Wasserrückhaltevermögen durch humusreiche, biologisch aktive Böden zur Vorbeugung und Abschwächung von Hochwasserereignissen in Zukunft noch wichtiger werden (Maroschek et al., 2009). Zusätzlich wird wahrscheinlich auch das Naturgefahrenpotential regionsspezifisch zunehmen. Zum Beispiel wird etwa die Erosionsgefährdung aufgrund der Zunahme von Starkniederschlägen ansteigen. In tieferen Lagen ist zwar allgemein mit geringeren Schneehöhen zu rechnen, jedoch aufgrund von häufigeren Nassschneesituationen auch mit vermehrten Lawinenanbrüchen im Waldbereich (Perzl und Kammerlander, 2010). Ein Beispiel aus den Dolomiten in Italien zeigt, dass es durch den Klimawandel aber auch zu geringerer Gefährdung durch Naturgefahren kommen könnte. So wird wegen der geringeren Schmelzwassermengen im Frühjahr mit einer Verminderung von Hangrutschungen gerechnet (Dehn, 1999).

Bisher stellte die Verfügbarkeit von qualitativ hochwertigem Trinkwasser im Alpenraum kein Problem dar. Mit Ausnahme einiger prioritär als Quellschutzwälder bewirtschafteter Flächen wurde die Sicherstellung der Trinkwasserschüttung im „Kielwasser" anderer Waldfunktionen als gegeben unterstellt. Bei weiter anhaltendem Eintrag von atmosphärischem Stickstoff in Waldökosysteme bei gleichzeitig klimabedingt zunehmenden Störungen und häufigeren Starkniederschlägen könnten die Nitratgehalte im Quellwasser jedoch über die Grenzwerte ansteigen (Herman et al., 2007). Um die Wasserqualität zu sichern, werden daher in Zukunft auf Quellschutz zugeschnittene Waldbaukonzepte notwendig werden, die spezielles Augenmerk auf waldhydrologisch günstige Baumartenzusammensetzung, stabile Bestandesaufbauformen und Humusmanagement legen.

Der österreichische Wald repräsentierte nach Weiss et al. (2000) im Jahr 1990 einen Kohlenstoffvorrat von 783 ±190 Mt C (Waldbiomasse: 320 ±42 Mt C; Waldboden:

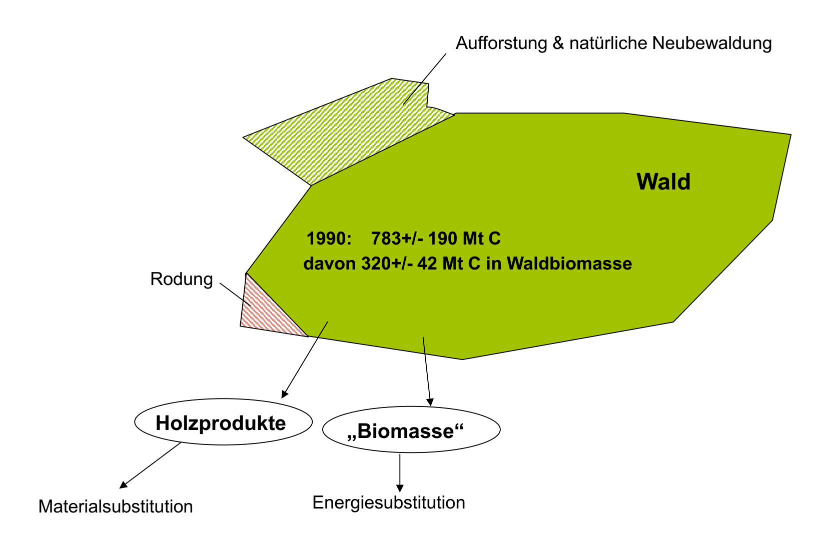


Abbildung 3.17 Klimaschutzfunktion des österreichischen Waldes. In situ waren 1990 nach Weiss et al. (2000) 783 Mt C gespeichert. Die Nutzung von Waldbiomasse wurde ex situ durch Substitution von fossilen Energieträgern sowie energieintensiveren Materialien durch Holzprodukte klimaschutzwirksam. Natürliche Neubewaldung = Zuwachsen von bisherigen Nichtwaldflächen

Figure 3.17 Climate change mitigation effects of the Austrian forests. In situ storage of 783 Mt C (Weiss et al., 2000), harvested biomass contributed ex situ to climate change mitigation via substitution of fossil fuels and energy intensive materials. Natural afforestation = forest succession on current non-forest land

463 ±185 Mt C; vgl. Abbildung 3.17) und somit den mit Abstand größten Kohlenstoffspeicher in der österreichischen Landschaft. Dieser Vorrat entspricht in etwa 40 österreichischen CO_2-Äq.-Emissionen der Treibhausgase CO_2, CH_4 und N_2O im Jahr 1990. Nach Weiss et al. (2000) war der österreichische Wald im Zeitraum 1961 bis 1996 eine Nettokohlenstoffsenke. Die mittlere jährliche Nettokohlenstoffbindung der Waldbiomasse betrug in diesem Zeitraum 2 527 kt C (9 267 Gg CO_2) mit einem Jahresminimum von 1 014 kt C und einem Jahresmaximum von 3 689 kt C (Unsicherheit ±748 kt C). Für den Zeitraum 1980 bis 1996 entspricht diese Nettokohlenstoffbindung etwa 14 % der gesamten österreichischen Brutto-CO_2-Äq.-Emission der Treibhausgase CO_2, CH_4 und N_2O.

Das Temperaturregime hat einen wesentlichen Einfluss auf den Bodenkohlenstoff. Eine Temperaturzunahme führt zu erhöhter mikrobieller Aktivität und damit zu erhöhten CO_2-Freisetzungsraten aus Waldböden. Experimentelle Klimamanipulationen in Achenkirch / Tirol zeigen dass bei einer Bodenerwärmung um 4 °C kurzfristig bis zu fünfzig Prozent mehr CO_2 ($-2{,}5$ t ha^{-1}) freigesetzt werden können (Schindlbacher et al., 2009). Inwieweit dieser Trend langfristig anhält und ob Österreichs Waldböden entsprechend große Mengen an Kohlenstoff verlieren, ist noch unklar und eine der zentralen Fragestellungen der Bodenökologie. Veränderungen im Niederschlag könnten den Bodenkohlenstoff in ähnlichem Umfang beeinflussen. Die Richtung kann allerdings entgegengesetzt sein, sodass vermehrte Trockenheit im Sommer möglicherweise zu einer verminderten Freisetzung von CO_2 und zu einer Kompensation des Erwärmungseffekts führt (Schindlbacher et al., 2012).

Dieser Temperatureffekt und ansteigende Nutzungen (z. T. durch Kalamitäten bedingt) haben in den 1990er und 2000er Jahren die Senkenstärke des österreichischen Waldes deutlich verringert (siehe dazu Band 3, Kapitel 2). Diese Entwicklung zeigt auf, dass in Zukunft in Abhängigkeit von Störungsregime und Bewirtschaftung die Kohlenstoffpools im Wald abnehmen könnten. Für eine Gesamtbewertung der waldbasierten Minderungswirkung ist jedoch der Energiesektor, Materialsubstitution und die Speicherung von Kohlenstoff in Holzprodukten zu berücksichtigen (siehe dazu Band 3, Kapitel 2).

Am Standort Poschach (Obergurgl, Ötztal) wurde festgestellt, dass die Verdrängung von Zwergsträuchern an der Waldgrenze nach Hochlagenaufforstung zu Kohlenstoffverlusten im Boden führt. Die Zwergsträucher *Calluna* und *Rhododendron* sind für ihre schlecht abbaubare Streu und für den extrem geschlossenen Nährstoffkreislauf bekannt. Die Böden unter Zwergsträuchern erwiesen sich als wesentlich kohlenstoffreicher als jene unter einem 50 Jahre alten Zirbenwald (Jandl, 2011). Dies hat Implikationen für die Kohlenstoffbilanz: Zwar wird in der oberirdischen Biomasse im Wald ein großer Kohlenstoffvorrat aufgebaut, doch wird gleichzeitig der stabilere Kohlenstoffvorrat im Boden abgebaut. Die Implikation für die österreichische Kohlenstoffbilanz ist, dass durch die Vegetationsänderung insgesamt nur ein kleiner Bodenkohlenstoffpool aufgebaut wird, der überdies stark auf Temperaturanstieg reagiert und leicht abbaubar ist.

Biologisch könnten die Wälder in Österreich in den kommenden Dekaden auch weiter zusätzlichen Kohlenstoff speichern (z. B. Zierl und Bugmann, 2007; Seidl et al., 2008, Hagedorn et al., 2010). Allerdings ist die Speicherleistung von Wäldern limitiert, da nicht unbegrenzt große Biomassevorräte und damit Kohlenstoffmengen aufgebaut werden können. Geht man davon aus, dass in Zukunft Störungsintensität und -häufigkeit zunehmen, besteht das Risiko, dass der durchschnittliche Hektarvorrat an Waldbiomasse sinken könnte. Die in situ Senkenwirkung der Waldflächen ist stark von der zukünftigen Nutzungsintensität abhängig. Obwohl Kohlen-

Tabelle 3.8 Qualitative Beurteilung der Vulnerabilität ausgewählter Ökosystemleistungen von Grünlandflächen im Ostalpenraum. (+) nicht vulnerabel, (−) vulnerabel. Die Aussagen basieren auf den gesamten Quellen die in vorangegangenen Kapiteln zu Arten und Ökosystemen verwendet wurden

Table 3.8 Qualitative judgement of vulnerability of grassland ecosystem services in Austria. (+) not vulnerable, (−) vulnerable. Based on all sources used in previous chapters on species and ecosystems

Ökosystemleistung	Einschätzung der Vulnerabilität	
Holzproduktion	+(−)	auf großen Flächen Zunahme der Produktivität; lokal-regional durch großflächige Störungen und durch Trockenheit gefährdet; langfristig Erhöhung des Laubholzanteiles
Kohlenstoffspeicherung	+(−)	korrespondiert tw. mit Holzproduktion; Kohlenstoffpools im Waldboden könnten bei Erwärmung durch intensiveres Störungsregime zur CO_2-Quelle werden
Objektschutz	−	durch höhere Störungsfrequenz, häufigere und intensivere Niederschlagsereignisse vulnerabel; wichtig zur Aufrechterhaltung von Infrastruktur und Siedlungsräumen
Trinkwasserschutz	−	durch höhere Störungsfrequenz, häufigere und intensivere Niederschlagsereignisse raschere Humusabbauraten und Nitratauswaschung vulnerabel
Biodiversität	+/−	über der Waldgrenze Verdrängung artenreicher Grasvegetation durch das Höherwandern der Waldgrenze; die Baumartendiversität in der montanen Vegetationsstufe nimmt zu

stoffspeicherung aufgrund der fehlenden Märkte zurzeit noch eine untergeordnete Rolle in der Waldbewirtschaftung in Österreich spielt, konnten erste Abschätzungen auf Basis von Simulationsmodellen zeigen, dass waldbauliche Maßnahmen die Senkenfunktion von Wirtschaftswald deutlich weiter erhöhen können (Seidl et al., 2007, 2008). Es würde allerdings zu kurz greifen, nur die in situ Klimaschutzfunktion der Wälder zu berücksichtigen. Über eine kaskadische Nutzung von Waldbiomasse kann dieser Effekt verstärkt werden (siehe dazu Band 3, Kapitel 2).

Neophyten, wie z. B. der Götterbaum, aber auch heimische Baumarten bilden im Klimawandel neue Nischen auf Standorten, wo sie bisher nicht konkurrenzstark genug waren. Für den Naturschutz ergeben sich daraus neue Herausforderungen (z. B. Maroschek und Lexer, 2010).

3.4.4 Grünland, Weiden und Wiesen

Die land- und forstwirtschaftlich genutzte Fläche in Österreich beträgt laut Agrarstrukturerhebung 2010 7 348 000 ha, davon werden 1 441 000 ha als Dauergrünland und 1 371 000 ha als Ackerland bewirtschaftet (BMLFUW, 2013). Eine Klimaveränderung hat potentiell großen Einfluss auf die landwirtschaftliche Produktion und könnte eine bedeutsame Veränderung der Landnutzung erzwingen (u. a. Schaumberger et al., 2011). An Ökosystemleistungen sind sowohl bei Grünland- als auch Ackerflächen Produktion (Futter, Nahrungsmittel), Kohlenstoffspeicherung in situ, Erosionsschutz, Trinkwasser-, Gewässerschutz und die Erhaltung der Biodiversität bedeutsam.

Das österreichische Grünland nimmt in all seinen sehr unterschiedlichen Ausprägungen eine ganz besondere Rolle in der Bereitstellung multifunktionaler Ökosystemleistungen durch die Landwirtschaft ein (Götzl et al., 2011). Neben der Produktion von hochwertigem Grundfutter erfüllt und unterstützt Grünland zahlreiche ökologische Funktionen wie Artenvielfalt, Erosions-, Boden- und Gewässerschutz und stellt ein markantes sowie unverzichtbares Element der Kultur- und Erholungslandschaft dar (Pötsch, 2012; vgl. auch Tabelle 3.8). Die zunehmenden Ansprüche der menschlichen Gesellschaft durch den steigenden Bedarf an Nahrungsmitteln sowie stofflich und energetisch genutzter Biomasse führen zu stärkeren Flächenkonkurrenzen, die durch die Verknappung fossiler Ressourcen und insbesondere durch den Klimawandel noch verstärkt werden (Exner, 2011).

Es gibt Grünlandflächen, die aufgrund der klimatischen oder topografischen Bedingungen nur eine extensive Nutzung zulassen. Die Analyse von Verschiebungen und Veränderungen zwischen intensivem und extensivem Grünland aufgrund von Klimawandeleffekten ist nur bedingt möglich, da intensives Grünland natürlich in Abhängigkeit von Rahmenbedingungen auch extensiv bewirtschaftet werden kann. Die Statistik zeigt eine Reduzierung der Grünlandflächen insgesamt. Das verbleibende Grünland muss daher intensiver genutzt werden, um die Erträge aufrechterhalten zu können. Eine intensivere Nutzung wirkt sich negativ auf die Biodiver-

Tabelle 3.9 Qualitative Beurteilung der Vulnerabilität ausgewählter Ökosystemleistungen von Ackerflächen im Ostalpenraum. (+) nicht vulnerabel, (–) vulnerabel. Die Aussagen basieren auf den gesamten Quellen die in vorangegangenen Kapiteln zu Arten und Ökosystemen verwendet wurden

Table 3.9 Qualitative judgement of vulnerability of selected arable ecosystem services in Austria. (+) not vulnerable, (–) vulnerable. Based on all sources used in previous chapters on species and ecosystems.

Ökosystemleistungen	Einschätzung der Vulnerabilität	
Produktion	+(–)	Überwiegend Zunahme der Produktivität durch autonome Anpassungen in der Produktionstechnik; Mögliche Zunahme der interannualen Ertragsschwankungen insbesondere durch Hitze und Trockenheit, regional auch durch andere Extremwetterereignisse (Hagel, Starkniederschläge) und Schaderreger
Kohlenstoffspeicherung	–	Kohlenstoffpools in Ackerböden könnten bei Erwärmung zur CO_2-Quelle werden, regional Gefährdung durch Bodenerosion
Standort-/Objektschutz	–	Bodenerosions- und Überflutungsgefahren durch häufigere und intensivere Niederschlagsereignisse
Trinkwasser-, Gewässerschutz	–	Durch höhere Störungsfrequenz, häufigere und intensivere Niederschlagsereignisse, Bodenerosionsgefahr, raschere Humusabbauraten und höhere Nährstoffauswaschung
Biodiversität	+/–	Gefährdung der Biodiversität durch Intensivierung; Steigerung der Biodiversität bei ökologischen oder naturnahen Landbaumethoden

sität aus. Der Bedarf an zusätzlicher Grünlandfläche könnte so manche bereits aufgegebene extensive Fläche wieder in die Nutzung zurückholen, falls sie noch nicht zu stark verwaldet ist.

Neben der Produktion von Futtermitteln spielt die Kohlenstoffspeicherung bei Grünland eine wichtige Rolle. So liegt das Verlustpotential an Kohlenstoff unter Grünland bei bis zu 13 t/ha, wenn kein Augenmerk auf adäquates Humusmanagement gelegt werden würde (von Haaren et al., 2010; Kirchner et al., 2012).

3.4.5 Ackerflächen

Der Flächennutzungsanteil des Ackerbaues ist vor allem in den Flachlandregionen Österreichs hoch. Bezüglich der Vulnerabilität von Ökosystemleistungen der Ackerflächen (Tabelle 3.9) spielt die Topografie eine bedeutende Rolle, wobei hier vor allem die Bodenerosionsanfälligkeit oder die klimatische Wasserbilanz von Bedeutung ist. Allgemein ist für die Vulnerabilität verschiedener Funktionen die Art der Bewirtschaftung von Bedeutung, wie die Bodenbearbeitung, die Fruchtfolgen und die Intensität der Bewirtschaftung (z. B. ökologisch oder konventionell).

Als Beispiel kann der Maisanbau dienen. Wegen der relativ späten Bestandesschließung sind extremere Niederschläge und höhere Winterniederschläge im Maisanbau hinsichtlich der Bodenerosion eine große Gefahr für das Ertragspotenzial des Bodens. Insbesondere in hügeligem Gelände und in den niederschlagsreicheren Anbaugebieten sind Bodenerosion und Verschlämmungen eine bedeutende Klimawandelfolge in bestimmten Regionen Österreichs, wie etwa im Weinviertel (Klik und Eitzinger, 2010).

3.4.6 Aquakulturen

Die wirtschaftliche Bedeutung von Fischzuchtanlagen in Österreich hat in den letzten Jahren zugenommen. Im niederösterreichischen Alpenvorland wurde untersucht, wie sich ein zu erwartender Klimawandel auf die Wassertemperatur bzw. die Durchflussmenge der Alpenvorlandflüsse auf Fischzuchtanlagen sowie das Biomassepotential generell auswirken kann (Heissenberger et al., 2010; Kainz, 2011).

Die derzeitige Wasserführung in diesen Alpenvorlandsflüssen liegt in der Regel um ein Vielfaches über dem Schwellwert der für Fischzuchtanlagen für Kaltwasserfische (Forellen, Saiblinge) erforderlich ist. Grundsätzlich sollten Kaltwasserarten wie Forellen und Saiblinge bei Wassertemperaturen $<18\,^\circ C$ gezogen werden. Dem Datensatz des Hydrographischen Jahrbuchs (2006) zufolge liegen z. B. die Wassertemperaturen im Flussunterlauf der Ybbs (Messstation Greimpersdorf) sowie der Erlauf (Messstation Niederndorf) in den Sommermonaten Juni und Juli bereits jetzt bei $>18\,^\circ C$ (Greimpersdorf: 20–21 °C; Niederndorf: 18,5–19,5 °C). Demzufolge werden bei steigenden Wassertemperaturen Aquakulturanlagen im Alpenvorland in Oberflussregionen gedrängt werden, wobei es jedoch insgesamt Steigerungspotential in Bezug auf produzierte Fischbiomasse gibt.

3.5 Forschungsbedarf
3.5 Research needs

Der Wissensstand zu Klimawandelauswirkungen auf die Biosphäre mit spezieller Berücksichtigung österreichischer Verhältnisse ist derzeit in Bezug auf Sektoren, Ökosysteme und Arten(-gruppen) äußerst heterogen. Intensiv beforscht wurden bisher land- und forstwirtschaftliche Sektoren mit zugehörigen Nutzpflanzen bzw. Baumarten und Waldökosystemen sowie einzelne Schädlinge (bzw. Störungsregime), die Hochgebirgsflora und ausgewählte Aspekte der Fauna (z. B. Fische und Gewässerökosysteme).

Der Forschungsbedarf in Bezug auf die Biosphäre ist daher im Allgemeinen bedeutend, die Relevanz hoch. Biodiversität ist die Grundlage für die Erbringung von Ökosystemleistungen, die für das menschliche Wohlbefinden unabdingbar sind. Die Biosphäre spielt eine Schlüsselrolle im globalen Kohlenstoffkreislauf und damit für den Klimaschutz.

- In bisher weniger beachteten Ökosystemtypen bzw. Artengruppen sollte der Wissensstand zu Klimawandeleffekten dringend verbessert werden. Als vordringlich wird die Identifikation klimasensitiver Arten, Lebensräume, Schutzgebiete und Ökosystemleistungen und der erforderlichen Maßnahmen für deren Schutz erachtet. Dies gilt in besonderem Maße für Teile der Biodiversität mit hoher Verantwortung (geschützte, gefährdete und prioritäre Arten und Lebensräume)
- Vermehrtes Augenmerk sollte auf die Auswirkungen von Extremereignissen (Hitze, Frost, Trockenheit, Stürme) und Störungsregime sowie die interannuelle Schwankung von Klimavariablen gelegt werden
- Der Kenntnisstand zur Sensitivität von Arten, Ökosystemen und Ökosystemleistungen in Bezug auf mögliche zukünftige Klimawandelpfade sollte durch gezielteres und konsistenteres Verwenden von mehreren Klimawandelszenarien in den Analysen verbessert werden
- Allgemein sind Forschungsanstrengungen dahingehend zu intensivieren, dass in der Klimafolgenforschung ein Methodenmix zur Anwendung gelangt, der Modellbildung und Simulation und empirisch-experimentelle Forschungsansätze kombiniert
- Anzustreben sind integrierte Untersuchungsansätze die verschiedene Artengruppen in Ökosystemen bzw. interagierende Ökosystemtypen in zeitlich-räumlichen Untersuchungsansätzen auf verschiedenen Skalen berücksichtigen, um das holistische Systemverständnis zu verbessern
- Insbesondere die Wechselwirkungen mit anderen Faktoren des Globalen Wandels (z. B. Landnutzung, Globalisierung) und die Anpassungskapazitäten der Arten und Lebensräume sind nicht ausreichend bekannt
- Die Einrichtung von Klimafolgen-Monitoringprogrammen (wie z. B. GLORIA) auf Grundlage wissenschaftlicher Methoden, die verschiedene Artengruppen oder Ökosysteme berücksichtigen, ist erforderlich, um klimawandelbedingte Änderungen der Biodiversität zu erkennen. Aufgrund der großen regionalen Vielfalt Österreichs sind räumlich-explizite, vergleichende Untersuchungen von hoher Relevanz

3.6 Literaturverzeichnis
3.6 References

Adrian, R., O'Reilly, C.M., Zagarese, H., Baines, S.B., Hessen, D.O., Keller, W., Livingstone, D.M., Sommaruga, R., Straile, D., Van Donk, E., Weyhenmeyer, G.A., Winder, M., 2009. Lakes as sentinels of climate change. Limnol Oceanogr 54, 2283–2297.

AGES, 2012. Maiswurzelbohrer [WWW Document]. URL http://www.ages.at/ages/landwirtschaftliche-sachgebiete/pflanzengesundheit/maiswurzelbohrer/ (accessed 6.14.12).

Ainsworth, E.A., Long, S.P., 2005. What have we learned from 15 years of free-air CO_2 enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO_2. New Phytologist 165, 351–372.

Alexandrov, V., Eitzinger, J., Cajic, V., Oberforster, M., 2002. Potential impact of climate change on selected agricultural crops in north-eastern Austria. Global Change Biology 8, 372–389. doi:10.1046/j.1354-1013.2002.00484.x

Ambus, P., Zechmeister-Boltenstern, S., Butterbach-Bahl, K., 2006. Sources of nitrous oxide emitted from European forest soils. Biogeosciences 3, 135–145.

Anonymus, 2009. Der Österreichische Wald. BMLFUW, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Abteilung I V/1, Wien.

Araújo, M.B., Thuiller, W., Pearson, R.G., 2006. Climate warming and the decline of amphibians and reptiles in Europe. Journal of Biogeography 33, 1712–1728.

Aspöck, H., 2007. Klimawandel und die Ausbreitung von Krankheiten: Durch Arthropoden übertragene Infektionen in Mitteleuropa. Entomologica Romanica 345–365.

Audsley, E., Pearn, K.R., Simota, C., Cojocaru, G., Koutsidou, E., Rounsevell, M.D.A., Trnka, M., Alexandrov, V., 2006. What can scenario modelling tell us about future European scale agricultural land use, and what not? Environmental Science & Policy 9, 148–162. doi:10.1016/j.envsci.2005.11.008

Austin, M.P., Smith, T.M., 1990. A new model for the continuum concept, in: Grabherr, G., Mucina, L., Dale, M.B., Ter Braak, C.J.F. (Eds.), Progress in Theoretical Vegetation Science. Advances in Vegetation Science, 11. Springer, Netherlands, pp. 35–47.

Bader, M.K.-F., Leuzinger, S., Keel, S.G., Siegwolf, R.T.W., Hagedorn, F., Schleppi, P., Körner, C., 2013. Central European hardwood trees in a high-CO_2 future: synthesis of an 8-year fo-

rest canopy CO_2 enrichment project. J Ecol 101, 1509–1519. doi:10.1111/1365-2745.12149

Bahn, M., Körner, C., 2003. Recent Increases in Summit Flora Caused by Warming in the Alps, in: Nagy, D.L., Grabherr, G., Körner, C., Thompson, D. (Eds.), Alpine Biodiversity in Europe, Ecological Studies. Springer Berlin Heidelberg, pp. 437–441.

Baier, P., Pennerstorfer, J., Schopf, A., 2007. PHENIPS—A comprehensive phenology model of *Ips typographus* (L.) (Col., Scolytinae) as a tool for hazard rating of bark beetle infestation. Forest Ecology and Management 249, 171–186. doi:10.1016/j.foreco.2007.05.020

Baker-Austin, C., Trinanes, J.A., Taylor, N.G.H., Hartnell, R., Siitonen, A., Martinez-Urtaza, J., 2012. Emerging Vibrio risk at high latitudes in response to ocean warming. Nature Climate Change 3, 73–77. doi:10.1038/nclimate1628

Bálint, M., Domisch, S., Engelhardt, C.H.M., Haase, P., Lehrian, S., Sauer, J., Theissinger, K., Pauls, S.U., Nowak, C., 2011. Cryptic biodiversity loss linked to global climate change. Nature Climate Change 1, 313–318. doi:10.1038/nclimate1191

Baltensweiler, W., 1993. Why the larch bud-moth cycle collapsed in the subalpine larch-cembran pine forests in the year 1990 for the first time since 1850. Oecologia 94, 62–66. doi:10.1007/BF00317302

Bates, J.W., 2009. Mineral nutrition, substratum ecology, and pollution, in: Shaw, J.A. (Ed.), Bryophyte Biology. Cambridge University Press, Cambridge, New York.

Bates, J.W., Ashton, N.W., Duckett, J.G. (Eds.), 1998. Bryology for the Twenty-first Century. Maney Publishing, Leeds.

Battarbee, R.W., Grytnes, J.-A., Thompson, R., Appleby, P.G., Catalan, J., Korhola, A., Birks, H.J.B., Heegaard, E., Lami, A., 2002. Comparing palaeolimnological and instrumental evidence of climate change for remote mountain lakes over the last 200 years. Journal of Paleolimnology 28, 161–179. doi:10.1023/A:1020384204940

Battisti, A., Stastny, M., Netherer, S., Robinet, C., Schopf, A., Roques, A., Larsson, S., 2005. Expansion of geographic range in the pine processionary moth caused by increased winter temperatures. Ecological Applications 15, 2084–2096. doi:10.1890/04-1903

Bauer, K., Fardossi, A., 2008. Auswirkungen des Klimawandels - Herausforderung der Zukunft (Teil1). Der Winzer.

Beardall, J., Raven, J.A., 2004. The potential effects of global climate change on microalgal photosynthesis, growth and ecology. Phycologia 43, 26–40. doi:10.2216/i0031-8884-43-1-26.1

Beardall, J., Stojkovic, S., 2006. Microalgae under Global Environmental Change: Implications for Growth and Productivity, Populations and Trophic Flow. ScienceAsia 32, 1–10. doi:10.2306/scienceasia1513-1874.2006.32(s1).001

Beatty, D.T., Barnes, A., Taylor, E., Pethick, D., McCarthy, M., Maloney, S.K., 2006. Physiological responses of *Bos taurus* and *Bos indicus* cattle to prolonged, continuous heat and humidity. Journal of Animal Science 84, 972–985.

Beck, W., 2010. Auswirkungen von Trockenheit und Hitze auf den Waldzustand in Deutschland – waldwachstumskundliche Ergebnisse der Studie im Auftrag des BMEL (Jahrestagung 2010). DVFFA - Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten. Sektion Ertragskunde.

Beierkuhnlein, C., Jentsch, A., Reineking, B., Schlumprecht, H., Ellwanger, G. Auswirkungen des Klimawandels auf Fauna, Flora und Lebensräume sowie Anpassungsstrategien des Naturschutzes. Natschutz. B.ologische Vielfalt. In Druck.

Bellard, C., Bertelsmeier, C., Leadley, P., Thuiller, W., Courchamp, F., 2012. Impacts of climate change on the future of biodiversity: Biodiversity and climate change. Ecology Letters 15, 365–377. doi:10.1111/j.1461-0248.2011.01736.x

Bentz, B.J., Régnière, J., Fettig, C.J., Hansen, E.M., Hayes, J.L., Hicke, J.A., Kelsey, R.G., Negrón, J.F., Seybold, S.J., 2010. Climate change and bark beetles of the western United States and Canada: direct and indirect effects. BioScience 60, 602–613.

Berg, B., McClaugherty, C., 2008. Plant litter: decomposition, humus formation, carbon sequestration, 2nd. ed. ed. Springer, Berlin.

Bergmann, J., Pompe, S., Ohlemüller, R., Freiberg, M., Klotz, S., Kühn, I., 2010. The Iberian Peninsula as a potential source for the plant species pool in Germany under projected climate change. Plant Ecology 207, 191–201. doi:10.1007/s11258-009-9664-6

Berthold, P., Helbig, A.J., Mohr, G., Querner, U., 1992. Rapid microevolution of migratory behaviour in a wild bird species. Nature 360, 668–670. doi:10.1038/360668a0

Bigler, C., Kulakowski, D., Veblen, T.T., 2005. Multiple disturbance interactions and drought influence fire severity in Rocky Mountain subalpine forests. Ecology 86, 3018–3029.

Blaustein, A.R., Walls, S.C., Bancroft, B.A., Lawler, J.J., Searle, C.L., Gervasi, S.S., 2010. Direct and indirect effects of climate change on amphibian populations. Diversity 2, 281–313. doi:10.3390/d2020281

Blenckner, T., Adrian, R., Livingstone, D.M., Jennings, E., Weyhenmeyer, G.A., George, D.G., Jankowski, T., Järvinen, M., Aonghusa, C.N., Nõges, T., Straile, D., Teubner, K., 2007. Large-scale climatic signatures in lakes across Europe: a meta-analysis. Global Change Biology 13, 1314–1326. doi:10.1111/j.1365-2486.2007.01364.x

Blennow, K., Sallnäs, O., 2004. WINDA – a system of models for assessing the probability of wind damage to forest stands within a landscape. Ecological Modelling 175, 87–99. doi:10.1016/j.ecolmodel.2003.10.009

Blümel, S., 2007. Klimawandel und die möglichen Auswirkungen auf die Pflanzengesundheit in Österreich. 48. Österreichische Pflanzenschutztage, Mautern a. d. Donau, 28.11.2007.

BMLFUW, 2013. Grüner Bericht 2013. Bericht über die Situation der österreichischen Land- und Forstwirtschaft. (Grüner Bericht gemäß § 9 des Landwirtschaftsgesetzes BGBl No. 375/1992). Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien [online].

Bogin, E., Avidar, Y., Pech-Waffenschmidt, V., Doron, Y., Israeli, B.-A., Kevkhayev, E., 1996. The relationship between heat stress, survivability and blood composition of the domestic chicken. Clinical Chemistry and Laboratory Medicine 34, 463–470.

Bonada, N., Dolédec, S., Statzner, B., 2007. Taxonomic and biological trait differences of stream macroinvertebrate communities between mediterranean and temperate regions: implications for future climatic scenarios. Global Change Biology 13, 1658–1671. doi:10.1111/j.1365-2486.2007.01375.x

Bosch, J., Carrascal, L.M., Durán, L., Walker, S., Fisher, M.C., 2007. Climate change and outbreaks of amphibian chytridiomycosis in a montane area of Central Spain; is there a link? Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences 274, 253–260. doi:10.1098/rspb.2006.3713

Bosch, J., Martínez-Solano, I., García-París, M., 2001. Evidence of a chytrid fungus infection involved in the decline of the common midwife toad (*Alytes obstetricans*) in protected areas of cen-

tral Spain. Biological Conservation 97, 331–337. doi:10.1016/S0006-3207(00)00132-4

Bosch, S., Schmidt-Chanasit, J., Fiedler, W., 2012. Das Usutu-Virus als Ursache von Massensterben bei Amseln *Turdus merula* und anderen Vogelarten in Europa: Erfahrungen aus fünf Ausbrüchen zwischen 2001 und 2011. Vogelwarte 50, 109–122.

Both, C., Visser, M.E., 2001. Adjustment to climate change is constrained by arrival date in a long-distance migrant bird. Nature 411, 296–298. doi:10.1038/35077063

Britton, A.J., Beale, C.M., Towers, W., Hewison, R.L., 2009. Biodiversity gains and losses: Evidence for homogenisation of Scottish alpine vegetation. Biological Conservation 142, 1728–1739. doi:10.1016/j.biocon.2009.03.010

Brook, B., Sodhi, N., Bradshaw, C., 2008. Synergies among extinction drivers under global change. Trends in Ecology & Evolution 23, 453–460. doi:10.1016/j.tree.2008.03.011

Brown, J.H., Stevens, G.C., Kaufman, D.M., 1996. The geographic range: size, shape, boundaries, and internal structure. Annual Review of Ecology and Systematics 27, 597–623.

Brugger, K., Rubel, F., 2009. Simulation of climate-change scenarios to explain Usutu-virus dynamics in Austria. Preventive Veterinary Medicine 88, 24–31. doi:10.1016/j.prevetmed.2008.06.023

Büntgen, U., Kauserud, H., Egli, S., 2012. Linking climate variability to mushroom productivity and phenology. Frontiers in Ecology and the Environment 10, 14–19. doi:10.1890/110064

Burger, K., Glauninger, J., 2007. Große Fingerhirse (*Digitaria sanguinalis*) und Wilde Fingerhirse (*Eleusine indica*): Wachstum und Entwicklung im Jahre 2007 in Niederösterreich. Posterpräsentation bei den Österreichischen Pflanzenschutztagen, 28.-29.11.2007, Mautern a.d. Donau.

Butin, H., 2011. Krankheiten der Wald-und Parkbäume. Diagnose-Biologie-Bekämpfung., 4., neubearbeitete Auflage. ed. Thieme, Stuttgart, New York.

Cabela, A., Grillitsch, H., Tiedemann, F., 2001. Atlas zur Verbreitung und Ökologie der Amphibien und Reptilien in Österreich. Auswertung der Herpetofaunistischen Datenbank am Naturhistorischen Museum in Wien (No. 066). Umweltbundesamt, Wien.

Calanca, P., Fuhrer, J., Jasper, K., Torriani, D., Keller, F., Dueri, S., 2005. Klimawandel und landwirtschaftliche Produktion. Agrarforschung 12, 392–397.

Cannell, M.G.R., Thornley, J.H.M., Mobbs, D.C., Friend, A.D., 1998. UK conifer forests may be growing faster in response to increased N deposition, atmospheric CO_2 and temperature. Forestry 71, 277–296.

Carroll, E.A., Sparks, T.H., Collinson, N., Beebee, T.J.C., 2009. Influence of temperature on the spatial distribution of first spawning dates of the common frog (*Rana temporaria*) in the UK. Global Change Biology 15, 467–473. doi:10.1111/j.1365-2486.2008.01726.x

Catalan, J., Pla-Rabés, S., Wolfe, A.P., Smol, J.P., Rühland, K.M., Anderson, N.J., Kopáček, J., Stuchlík, E., Schmidt, R., Koinig, K.A., Camarero, L., Flower, R.J., Heiri, O., Kamenik, C., Korhola, A., Leavitt, P.R., Psenner, R., Renberg, I., 2013. Global change revealed by palaeolimnological records from remote lakes: a review. Journal of Paleolimnology 49, 513–535. doi:10.1007/s10933-013-9681-2

Cate, P., Klapal, H., Kahrer, A., Wurm, O., 2006. Der Maiswurzelbohrer (*Diabrotica virgifera virgifera*) 2006 in Österreich – Ergebnisse aus Monitoring und Versuchstätigkeit. Österreichische Pflanzenschutztage, 29.-30.11.2006, Schloss Seggau/Leibnitz.

Cech, T., Perny, B., 1998. Kiefernsterben in Tirol. Forstschutz Aktuell 22, 12–15.

Chadwick, E.A., Slater, F.M., Ormerod, S.J., 2006. Inter- and intraspecific differences in climatically mediated phenological change in coexisting *Triturus* species. Global Change Biology 12, 1069–1078. doi:10.1111/j.1365-2486.2006.01156.x

Chakraborty, S., Tiedemann, A.V., Teng, P.S., 2000. Climate change: potential impact on plant diseases. Environmental Pollution 108, 317–326. doi:10.1016/S0269-7491(99)00210-9

Chamaillé-Jammes, S., Massot, M., Aragón, P., Clobert, J., 2006. Global warming and positive fitness response in mountain populations of common lizards *Lacerta vivipara*. Global Change Biology 12, 392–402. doi:10.1111/j.1365-2486.2005.01088.x

Chmielewski, F.M., Blümel, K., Henniges, Y., Müller, A., Görgens, M., Weber, R.W.S., Kemfert, C., Kremers, H., 2007. Klimawandel und Obstbau in Deutschland (KLIO). BMBF-Verbundprojekt unter Koordination der Humboldt-Universität zu Berlin (1. Zwischenbericht, Gesamtbericht). Berlin.

Chmielewski, F.-M., Roetzer, T., 2002. Annual and spatial variability of the beginning of growing season in Europe in relation to air temperature changes. Climate Research 19, 257–264. doi:10.3354/cr019257

Ciais, P., Schelhaas, M.J., Zaehle, S., Piao, S.L., Cescatti, A., Liski, J., Luyssaert, S., Le-Maire, G., Schulze, E.-D., Bouriaud, O., Freibauer, A., Valentini, R., Nabuurs, G.J., 2008. Carbon accumulation in European forests. Nature Geoscience 1, 425–429. doi:10.1038/ngeo233

Clements, A.C., Pfeiffer, D.U., Martin, V., Otte, M.J., 2007. A Rift Valley fever atlas for Africa. Preventive Veterinary Medicine 82, 72–82. doi:10.1016/j.prevetmed.2007.05.006

Colombari, F., Battisti, A., Schroeder, L.M., Faccoli, M., 2012. Life-history traits promoting outbreaks of the pine bark beetle *Ips acuminatus* (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) in the south-eastern Alps. European Journal of Forest Research 131, 553–561. doi:10.1007/s10342-011-0528-y

Cook, G.C., 1992. Effect of global warming on the distribution of parasitic and other infectious diseases: a review. Journal of the Royal Society of Medicine 85, 688-691.

Cooper, E.J., 2004. Out of sight, out of mind: Thermal acclimation of root respiration in Arctic Ranunculus. Arctic, Antarctic, and Alpine Research 36, 308–313. doi:10.1657/1523-0430(2004)036[0308:OOSOOM]2.0.CO;2

Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P., van den Belt, M., 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature 387, 253–260. doi:10.1038/387253a0

Coste, M., Ector, L., 2000. Diatomées invasives exotiques ou rares en France: Principales observations effectuées au cours des dernières décennies. Systematics and Geography of Plants 70, 373–400. doi:10.2307/3668651

Courbaud, B., Kunstler, G., Morin, X., Cordonnier, T., 2010. What is the future of the ecosystem services of the Alpine forest against a backdrop of climate change? Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine. doi:10.4000/rga.1317

D'Amen, M., Bombi, P., 2009. Global warming and biodiversity: Evidence of climate-linked amphibian declines in Italy. Biological Conservation 142, 3060–3067. doi:10.1016/j.biocon.2009.08.004

Dämon, W., Krisai-Greilhuber, I., 2012. Die Datenbank der Pilze Österreichs. Stapfia 96, 245–330.

Danby, R.K., Hik, D.S., 2007. Evidence of Recent Treeline Dynamics in Southwest Yukon from Aerial Photographs. Arctic 60, 411–420.

Daszak, P., Cunningham, A.A., Hyatt, A.D., 2003. Infectious disease and amphibian population declines. Diversity and Distributions 9, 141–150. doi:10.1046/j.1472-4642.2003.00016.x

Dawson, T.P., Jackson, S.T., House, J.I., Prentice, I.C., Mace, G.M., 2011. Beyond Predictions: Biodiversity Conservation in a Changing Climate. Science 332, 53–58. doi:10.1126/science.1200303

De Witte, L.C., Armbruster, G.F.J., Gielly, L., Taberlet, P., Stöcklin, J., 2012. AFLP markers reveal high clonal diversity and extreme longevity in four key arctic-alpine species. Molecular Ecology 21, 1081–1097. doi:10.1111/j.1365-294X.2011.05326.x

Dehn, M., 1999. Application of an analog downscaling technique to the assessment of future landslide activity - a case study in the Italian Alps. Climate Research 13, 103–113. doi:10.3354/cr013103

DeLong, E.F., Pace, N.R., 2001. Environmental diversity of bacteria and archaea. Systematic Biology 50, 470–478. doi:10.1080/10635150118513

Desprez-Loustau, M.-L., Marçais, B., Nageleisen, L.-M., Piou, D., Vannini, A., 2006. Interactive effects of drought and pathogens in forest trees. Annals of Forest Science 63, 597–612. doi:10.1051/forest:2006040

Devictor, V., van Swaay, C., Brereton, T., Brotons, L., Chamberlain, D., Heliölä, J., Herrando, S., Julliard, R., Kuussaari, M., Lindström, Å., Reif, J., Roy, D.B., Schweiger, O., Settele, J., Stefanescu, C., Van Strien, A., Van Turnhout, C., Vermouzek, Z., WallisDeVries, M., Wynhoff, I., Jiguet, F., 2012. Differences in the climatic debts of birds and butterflies at a continental scale. Nature Clim. Change 2, 121–124. doi:10.1038/nclimate1347

Diepolder, M., 2007. Auswirkungen und Strategien für die Grünlandwirtschaft unter dem Aspekt gegenwärtiger Rahmenbedingungen und ertragsphysiologischer Parameter, in: Klimaänderung und Landwirtschaft - Bestandsaufnahme und Handlungsstrategien für Bayern. Tagungsband, Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL). Presented at the 6. Kulturlandschaftstag, Bayrischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising-Weihenstephan, pp. 93–104.

Diez, J.M., D'Antonio, C.M., Dukes, J.S., Grosholz, E.D., Olden, J.D., Sorte, C.J., Blumenthal, D.M., Bradley, B.A., Early, R., Ibáñez, I., Jones, S.J., Lawler, J.J., Miller, L.P., 2012. Will extreme climatic events facilitate biological invasions? Frontiers in Ecology and the Environment 10, 249–257. doi:10.1890/110137

Dirnböck, T., Dullinger, S., Grabherr, G., 2003. A regional impact assessment of climate and land-use change on alpine vegetation. Journal of Biogeography 30, 401–417. doi:10.1046/j.1365-2699.2003.00839.x

Dirnböck, T., Essl, F., Rabitsch, W., 2011. Disproportional risk for habitat loss of high-altitude endemic species under climate change. Global Change Biology 17, 990–996. doi:10.1111/j.1365-2486.2010.02266.x

Dobbertin, M., Hilker, N., Rebetez, M., Zimmermann, N.E., Wohlgemuth, T., Rigling, A., 2005. The upward shift in altitude of pine mistletoe (*Viscum album* ssp. *austriacum*) in Switzerland—the result of climate warming? Int J Biometeorol 50, 40–47. doi:10.1007/s00484-005-0263-5

Dohm, D.J., O'Guinn, M.L., Turell, M.J., 2002. Effect of environmental temperature on the ability of *Culex pipiens* (Diptera: Culicidae) to transmit West Nile virus. Journal of Medical Entomology 39, 221–225. doi:10.1603/0022-2585-39.1.221

Dokulil, M.T., 2014. Predicting summer surface water temperatures for large Austrian lakes in 2050 under climate change scenarios. Hydrobiologia 731:19-29, DOI 10.1007/s10750-013-1550-5

Dokulil, M.T., Mayer, J., 1996. Population dynamics and photosynthetic rates of a *Cylindrospermopsis - Limnothrix* association in a highly eutrophic urban lake, Alte Donau, Vienna, Austria. Algological Studies 83, 179–195.

Dokulil, M.T., Teubner, K., 2005. The global warming versus re-oligotrophication controversy in lakes: Can effects on phytoplankton be disentangled? Phycologia (Suppl.) 44, 28–29.

Dokulil, M.T., Jagsch, A., George, G.D., Anneville, O., Jankowski, T., Wahl, B., Lenhart, B., Blenckner, T., Teubner, K., 2006. Twenty years of spatially coherent deepwater warming in lakes across Europe related to the North Atlantic Oscillation. Limnology and Oceanography 51, 2787–2793. doi:10.4319/lo.2006.51.6.2787

Dokulil, M.T., Teubner, K., 2011. Eutrophication and Climate Change: Present Situation and Future Scenarios, in: Ansari, A.A., Gill, S.S., Lanza, G.R., Rast, W. (Eds.), Eutrophication: Causes, Consequences and Control. Springer Netherlands, pp. 1–16.

Dokulil, M.T., Teubner, K., 2012. Deep living *Planktothrix rubescens* modulated by environmental constraints and climate forcing. Hydrobiologia 698, 29–46. doi:10.1007/s10750-012-1020-5

Dokulil, M.T., Teubner, K., Jagsch, A., Nickus, U., Adrian, R., Straile, D., Jankowski, T., Herzig, A., Padisák, J., 2010. The Impact of Climate Change on Lakes in Central Europe, in: George, G. (Ed.), The Impact of Climate Change on Lakes in Central Europe, Aquatic Ecology Series. Springer Netherlands, pp. 387–409.

Domisch, S., Jähnig, S.C., Haase, P., 2011. Climate-change winners and losers: stream macroinvertebrates of a submontane region in Central Europe. Freshwater Biology 56, 2009–2020. doi:10.1111/j.1365-2427.2011.02631.x

Doncaster, C.P., Micol, T., 1990. Response by coypus to catastrophic events of cold and flooding. Ecography 13, 98–104. doi:10.1111/j.1600-0587.1990.tb00594.x

Dörfelt, H., Ruske, E., 2008. Die Welt der Pilze, 2nd ed. Weissdorn-Verlag Jena, Jena.

Dullinger, S., Dirnböck, T., Grabherr, G., 2004. Modelling climate change-driven treeline shifts: relative effects of temperature increase, dispersal and invasibility. Journal of Ecology 92, 241–252. doi:10.1111/j.0022-0477.2004.00872.x

Dullinger, S., Dirnböck, T., Köck, R., Hochbichler, E., Englisch, T., Sauberer, N., Grabherr, G., 2005. Interactions among tree-line conifers: differential effects of pine on spruce and larch. Journal of Ecology 93, 948–957. doi:10.1111/j.1365-2745.2005.01036.x

Dullinger, S., Gattringer, A., Thuiller, W., Moser, D., Zimmermann, N.E., Guisan, A., Willner, W., Plutzar, C., Leitner, M., Mang, T., 2012. Extinction debt of high-mountain plants under 21st century climate change. Nature Climate Change 2, 619–622. doi:10.1038/nclimate1514

Dunn, P.O., Winkler, 2010. Effects of climate change on timing of breeding and reproductive success in birds, in: Møller, A.P., Fiedler, W., Berthold, P. (Eds.), Effects of Climate Change on Birds. Oxford University Press, Oxford; New York, pp. 113–128.

EC, 2009. Zusammenfassender Bericht über den Erhaltungszustand von Arten und Lebensraumtypen gemäß Artikel 17 der Habitatrichtlinie (Bericht der Kommission an den Rat und das Europäische Parlament No. KOM(2009) 358 endgültig). Brüssel, 13. Juli 2009.

EEA, 2008. Impacts of Europe's changing climate - 2008 indicator-based assessment (No. 4). EEA (European Environment Agency), Copenhagen.

EEA, 2010. Europe's ecological backbone: recognising the true value of our mountains (Report No. 6/2010). European Environment Agency.

Egli, S., 2011. Mycorrhizal mushroom diversity and productivity—an indicator of forest health? Annals of Forest Science 68, 81–88. doi:10.1007/s13595-010-0009-3

Egli, S., Brunner, I., 2011. Mykorrhiza. Eine faszinierende Lebensgemeinschaft im Wald. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Merkblatt für die Praxis 35, 3. Auflage, Birmensdorf, Schweiz.

Eitzinger, J., 2007. Einfluss des Klimawandels auf die Produktionsrisiken in der österreichischen Landwirtschaft und mögliche Anpassungsstrategien. Ländlicher Raum (www.laendlicher-raum.at) 10.

Eitzinger, J., Kubu, G. (Eds.), 2009. Impact of Climate Change and Adaptation in Agriculture. Extended Abstracts of the International Symosium, Boku-Met Report. University of Natural Ressources and Applied Life Sciences (BOKU), Vienna, Vienna.

Eitzinger, J., Kubu, G., Thaler, S., 2010. Konsequenzen des Klimawandels für das Ertragspotenzial und den Wasserhaushalt landwirtschaftlicher Pflanzenproduktion, in: ÖWAV (Ed.), Auswirkungen des Klimawandels auf Hydrologie und Wasserwirtschaft in Österreich. Präsentation Der Aktuellen Studien. Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, Wien, pp. 181–191.

Eitzinger, J., Stastná, M., Zalud, Z., Dubrovskỳ, M., 2003. A simulation study of the effect of soil water balance and water stress on winter wheat production under different climate change scenarios. Agricultural Water Management 61, 195–217.

Eitzinger, J., Kubu, G., Thaler, S., Alexandrov, U., Utset, V., Mihailovic, D.T., Lalic, B., Trnka, M., Zalud, Z., Semeradova, D., Ventrella, D., Anastasiou, D.P., Medany, M., Altaher, S., Olejnik, J., Lesny, J., Nemeshko, N., Simota, C., Cojocaru, G., 2009a. Final report, including recommendations on adaptation measures considering regional aspects. Final scientific report of the ADAGIO Project: „Adaptation of agriculture in European regions at environmental risk under climate change"; Specific Support Action, FP6-2005-SSP-5-A, Proj.No.044210, Sixth Framework Programme (European Commission). (Final Report No. FP6-2005SSP-5-A). BOKU, Vienna.

Eitzinger, J., Kubu, G., Thaler, S., Trnka, M., 2009b. Der Klimawandel, seine absehbaren Folgen für die Landwirtschaft in Oberösterreich und Anpassungsstrategien (Sonderbericht), in: Amt der Oö. Landesregierung (Ed.), Grüner Bericht 2008 - 30. Bericht über die wirtschaftliche und soziale Lage der oberösterreichischen Land- und Forstwirtschaft im Jahr 2008. Amt der Oö. Landesregierung, Linz, pp. 97–106.

Eitzinger, J., Kersebaum, K.C., Formayer, H., 2009c. Landwirtschaft im Klimawandel: Auswirkungen und Anpassungsstrategien für die Land- und Forstwirtschaft in Mitteleuropa. Agrimedia, Clenze, Deutschland.

Eitzinger, J., Laube, W., Gerersdorfer, T., Grabenweger, P., Reitner, H., Heinrich, M., Murer, E., Juni 4, 2012b. Naturraumanalyse im Weinbaugebiet Carnuntum - Klima, in: ALVA Arbeitsgemeinschaft für Lebensmittel-, V.A. (Ed.), Ernährung Sichern – Trotz. B. grenzter Ressourcen. Tagungsband 2012. Lehr- und Forschungszentrum für Gartenbau, Schönbrunn, pp. 125–127.

Eitzinger, J., Trnka, M., Semerádová, D., Thaler, S., Svobodová, E., Hlavinka, P., Šiška, B., Takáč, J., Malatinská, L., Nováková, M., Dubrovský, M., Žalud, Z., 2013. Regional climate change impacts on agricultural crop production in Central and Eastern Europe – hotspots, regional differences and common trends. The Journal of Agricultural Science 151, 787–812. doi:10.1017/S0021859612000767

Elith, J., H. Graham, C., Anderson, R.P., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., Hijmans, R.J., Huettmann, F., Leathwick, J.R., Lehmann, A., Li, J., Lohmann, L.G., Loiselle, B.A., Manion, G., Moritz, C., Nakamura, M., Nakazawa, Y., Overton, J.M.M., Townsend Peterson, A., Phillips, S.J., Richardson, K., Scachetti-Pereira, R., Schapire, R.E., Soberón, J., Williams, S., Wisz, M.S., Zimmermann, N.E., 2006. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. Ecography 29, 129–151. doi:10.1111/j.2006.0906-7590.04596.x

Elliott, J.M., 1981. Some aspects of thermal stress on freshwater teleosts, in: Pickering, A.D. (Ed.), Stress and Fish. Academic Press, London; New York, pp. 209–245.

Ellwood, N.T.W., Whitton, B.A., 2007. Importance of organic phosphate hydrolyzed in stalks of the lotic diatom *Didymosphenia geminata* and the possible impact of atmospheric and climatic changes. Hydrobiologia 592, 121–133. doi:10.1007/s10750-007-0728-0

Elser, J.J., 2011. A World Awash with Nitrogen. Science 334, 1504–1505. doi:10.1126/science.1215567

Engelhardt, W. von (Ed.), 2000. Physiologie der Haustiere. Enke Verlag, Stuttgart.

Engesser, R., Forster, B., Meier, F., Wermelinger, B., 2008. Forstliche Schadorganismen im Zeichen des Klimawandels. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 159, 344–351. doi:10.3188/szf.2008.0344

Engler, R., Randin, C.F., Vittoz, P., Czáka, T., Beniston, M., Zimmermann, N.E., Guisan, A., 2009. Predicting future distributions of mountain plants under climate change: does dispersal capacity matter? Ecography 32, 34–45.

Engler, R., Randin, C.F., Thuiller, W., Dullinger, S., Zimmermann, N.E., Araújo, M.B., Pearman, P.B., Le Lay, G., Piedallu, C., Albert, C.H., Choler, P., Coldea, G., De LAMO, X., Dirnböck, T., Gégout, J.-C., Gómez-García, D., Grytnes, J.-A., Heegaard, E., Høistad, F., Nogués-Bravo, D., Normand, S., Puşcaş, M., Sebastià, M.-T., Stanisci, A., Theurillat, J.-P., Trivedi, M.R., Vittoz, P., Guisan, A., 2011. 21st century climate change threatens mountain flora unequally across Europe. Global Change Biology 17, 2330–2341. doi:10.1111/j.1365-2486.2010.02393.x

Englisch, T., Niklfeld, H., Schratt-Ehrendorfer, L., 2005. Biologische Vielfalt - Pflanzenreichtum in den Landschaften Österreichs, in: Borsdorf, A. (Ed.), Das neue Bild Österreichs: Strukturen und Entwicklungen im Alpenraum und in den Vorländern. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien.

Enserink, M., 2006. During a Hot Summer, Bluetongue Virus Invades Northern Europe. Science 313, 1218–1219. doi:10.1126/science.313.5791.1218a

Erschbamer, B., Grabherr, G., Reisigl, H., 1983. Spatial pattern in dry grassland communities of the Central Alps and its ecophysiological significance. Vegetatio 54, 143–151. doi:10.1007/BF00047102

Essl, F., Rabitsch, W. (Eds.), 2013. Biodiversität und Klimawandel - Auswirkungen und Handlungsoptionen für den Naturschutz in Mitteleuropa. Springer, Berlin.

Essl, F., Staudinger, M., Stöhr, O., Schratt-Ehrendorfer, L., Rabitsch, W., Niklfeld, H., 2009. Distribution patterns, range size and niche breadth of Austrian endemic plants. Biological Conservation 142, 2547–2558. doi:10.1016/j.biocon.2009.05.027

Essl, F., Dullinger, S., Moser, D., Rabitsch, W., Kleinbauer, I., 2012. Vulnerability of mires under climate change: implications for nature conservation and climate change adaptation. Biodivers Conserv 21, 655–669. doi:10.1007/s10531-011-0206-x

Essl, F., Rabitsch, W., Dullinger, S., Moser, D., Milasowszky, N., 2013. How well do we know species richness in a well-known continent? Temporal patterns of endemic and widespread species descriptions in the European fauna. Global Ecology and Biogeography 22, 29–39. doi:10.1111/j.1466-8238.2012.00787.x

European Environment Agency EEA, 2009. Water resources across Europe – confronting water scarcity and drought (EEA Report No. 2). European Environment Agency (EEA), Office for Official Publications of the European Communities (OPOCE), Copenhagen.

Exner, A., 2011. Save our surface (No. 57/2011), Sustainable Austria.

Falasco, E., Bona, F., 2013. Recent findings regarding non-native or poorly known diatom taxa in north-western Italian rivers. Journal of Limnology 72. doi:10.4081/jlimnol.2013.e4

Falkowski, P., 2012. Ocean Science: The power of plankton. Nature 483, S17–S20. doi:10.1038/483S17a

Fardossi, A., 2007. Physiologische Untersuchungen an Weinkulturen unter besonderer Berücksichtigung von Stressfaktoren als wahrscheinliche Auslöser der Traubenwelke. HBLA/BA Klosterneuburg.

Ficetola, G.F., Thuiller, W., Padoa-Schioppa, E., 2009. From introduction to the establishment of alien species: bioclimatic differences between presence and reproduction localities in the slider turtle. Diversity and Distributions 15, 108–116. doi:10.1111/j.1472-4642.2008.00516.x

Fierer, N., Leff, J.W., Adams, B.J., Nielsen, U.N., Bates, S.T., Lauber, C.L., Owens, S., Gilbert, J.A., Wall, D. h., Caporaso, J.G., 2012. Cross-biome metagenomic analyses of soil microbial communities and their functional attributes. PNAS 109, 21390–21395. doi:10.1073/pnas.1215210110

Fischer, M.A., Oswald, K., Adler, W., 2008. Exkursionsflora für Österreich, Liechtenstein und Südtirol, 3, 3rd ed. Biologiezentrum der Oberösterreichischen Landesmuseen, Linz.

Flaim, G., Rott, E., Frassanito, R., Guella, G., Obertegger, U., 2010. Eco-fingerprinting of the dinoflagellate *Borghiella dodge*i: experimental evidence of a specific environmental niche. Hydrobiologia 639, 85–98. doi:10.1007/s10750-009-0013-5

Follak, S., 2007. Neue Unkrautprobleme in der Landwirtschaft – Welche Rolle spielt der Klimawandel?, in: Österreichische Arbeitsgemeinschaft für integrierten Pflanzenschutz (Ed.), 48. Österreichische Pflanzenschutztage, 28.-29.11.2007, Mautern A.d. Donau. Mautern a.d. Donau.

Follak, S., 2008. Zum Auftreten neuer Unkrautarten in der Steiermark. Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährun gssicherheit, Institut für Pflanzengesundheit, [online].

Follak, S., Dullinger, S., Kleinbauer, I., Moser, D., Essl, F., 2013. Invasion dynamics of three allergenic invasive Asteraceae (*Ambrosia trifida, Artemisia annua, Iva xanthiifolia*) in central and eastern Europe. Preslia 85, 41–61.

Fragner, H., 2010. Wichtige Unkrautprobleme in steirischen Feldkulturen in den Jahren 2008 und 2009. Masterarbeit. Universität für Bodenkultur, Wien.

Francesca, S., Simona, G., Francesco Nicola, T., Andrea, R., Vittorio, R., Federico, S., Cynthia, R., Maria Lodovica, G., 2006. Downy mildew (*Plasmopara viticola*) epidemics on grapevine under climate change. Global Change Biology 12, 1299–1307. doi:10.1111/j.1365-2486.2006.01175.x

Fresner, R., Schulz, L., Mairitsch, M., 1998. *Oscillatoria princeps* Vauch. (Cyanophycae) im Ossiacher See. Carinthia II 188/108. Jahrgang, 531–534.

Freyer, B., 2003. Fruchtfolgen: [konventionell, integriert, biologisch. Ulmer, Stuttgart (Hohenheim).

Freyer, B., Surböck, A., Friedel, J.K., Heinzinger, M., 2007. Zukunft einer ökologisch genutzten Agrarlandschaft. GAIA-Ökologische Perspektiven für Wissenschaft und Gesellschaft 16, 158–160.

Frommer, U., 2010. Beobachtungen zum Ausbreitungsverhalten der Efeu-Seidenbiene *Colletes hederae* Schmidt und Westrich, 1993 (Hymenoptera, Apidae) in Hessen und die Bedeutung des blühenden Efeus (*Hedera helix* L.). Hessische Faunistische Briefe 29, 1–20.

Fuhrer, J., 2003. Agroecosystem responses to combinations of elevated CO_2, ozone, and global climate change. Agriculture, Ecosystems & Environment 97, 1–20. doi:10.1016/S0167-8809(03)00125-7

Fuhrer, J., 2006. Sustainability of Crop Production Systems under Climate Change, in: Newton, P.C.D., Carran, R.A., Edwards, G.R., Niklaus, P.A. (Eds.), Agroecosystems in a Changing Climate. CRC Press, Florida, pp. 167–185.

Fuhrer, J., 2007. Sustainability of Crop Production Systems under Climate Change., in: Newton, P.C.D., Carran, R.A., Edwards, G.R., Niklaus, P.A. (Eds.), Agroecosystems in a Changing Climate. CRC Press, Florida, USA.

Fuhrer, J., Calanca, P., Defila, C., Forrer, H.-R., Lehmann, B., Luder, W., Müller-Ferch, G., Münger, A., Sonnevelt, M., Uebersax, A., 2007. Landwirtschaft, in: OcCC/ProClim (Ed.), Klimaänderung Und Die Schweiz 2050. Erwartete Auswirkungen Auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft. Bern, pp. 41–53.

Galloy, V., Denoël, M., 2010. Detrimental effect of temperature increase on the fitness of an amphibian (*Lissotriton helveticus*). Acta Oecologica 36, 179–183. doi:10.1016/j.actao.2009.12.002

Gange, A.C., Gange, E.G., Sparks, T.H., Boddy, L., 2007. Rapid and recent changes in fungal fruiting patterns. Science 316, 71–71. doi:10.1126/science.1137489

Garcia, J.-L., Patel, B.K.., Ollivier, B., 2000. Taxonomic, phylogenetic, and ecological diversity of methanogenic archaea. Anaerobe 6, 205–226. doi:10.1006/anae.2000.0345

Garner, T.W.J., Rowcliffe, J.M., Fisher, M.C., 2011. Climate change, chytridiomycosis or condition: an experimental test of amphibian survival. Global Change Biology 17, 667–675. doi:10.1111/j.1365-2486.2010.02272.x

Garrett, K.A., 2008. Climate change and plant disease risk., in: Relman, D.A., Hamburg, M.A., Choffnes, E.R., Mack, A. (Eds.), Global Climate Change and Extreme Weather Events: Understanding the Contributions to Infectious Disease Emergence: Workshop Summary. National Academies Press (US), Washington (DC), pp. 143–155.

Garrett, K.A., Dendy, S.P., Frank, E.E., Rouse, M.N., Travers, S.E., 2006. Climate change effects on plant disease: genomes to ecosystems. Annu Rev Phytopathol 44, 489–509. doi:10.1146/annurev.phyto.44.070505.143420

Gehrig-Fasel, J., Guisan, A., Zimmermann, N.E., 2007. Tree line shifts in the Swiss Alps: Climate change or land abandonment? Journal of Vegetation Science 18, 571–582. doi:10.1111/j.1654-1103.2007.tb02571.x

Geiser, E., 1998. Wie viele Tierarten leben in Österreich? Erfassung, Hochrechnung und Abschätzung. Verh.zool.-bot.Ges. Österreich 135, 81–93.

Gerersdorfer, T., Brandenburg, C., Bahrs, E., Eitzinger, J., 2010. Der Beitrag von Landschaftsstrukturen (z. B. Windschutzhecken) zur Ertragssituation im Ackerbau in Ostösterreich, in: Matzarakis, A., Mayer, H., Chmielewski, F.M. (Eds.), Proceedings of the 7th Conference on Biometeorology. Berichte des meteorologischen

Instituts der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. Albert-Ludwigs-University of Freiburg, Freiburg, Germany, pp. 32–38.

Gerten, D., Adrian, R., 2000. Climate-driven changes in spring plankton dynamics and the sensitivity of shallow polymictic lakes to the North Atlantic Oscillation. Limnology and Oceanography 45, 1058–1066. doi:10.4319/lo.2000.45.5.1058

Glauninger, J., 2011. Neue Unkräuter - Wissen fehlt noch. Bio Austria Fachzeitschrift für Landwirtschaft und Ökologie 16–17.

Glauninger, J., Holzner, W., Klug, P., 2006. Neue Unkrautarten auf Ackerland – eine Herausforderung für Wissenschaft und Praxis. Österreichische Pflanzenschutztage, 29.-30.11.2006, Schloss Seggau/Leibnitz.

Glauninger, J., Kersebaum, K.C., 2009. Auswirkungen von Klimaveränderungen auf biogene Schadfaktoren., in: Eitzinger, J., Kersebaum, K.C., Formayer, H. (Eds.), Landwirtschaft Im Klimawandel: Auswirkungen Und Anpassungsstrategien Für Die Land- Und Forstwirtschaft in Mitteleuropa. Agrimedia, Clenze, Deutschland.

Glauninger, J., Holzweber, M., Kronberger, E., 2010. Kartoffeln: Alternaria-Befallssituation 2009 und 2010 im Weinviertel / Ostösterreich. Witterungsbedingt unterschiedliche Ausprägung der Sortenanfälligkeit. Der Pflanzenarzt 63, 16–17.

Glime, J.M., 2007. Bryophyte Ecology. Volume 1. Physiological Ecology. (e-book). Michigan Technological University and the International Association of Bryologists, Houghton, Michigan.

Gollmann, G., 2007. Rote Liste der in Österreich gefährdeten Lurche (Amphibia) und Kriechtiere (Reptilia), in: Zulka, K.P. (Ed.), Rote Listen Gefährdeter Tiere Österreichs: Kriechtiere, Lurche, Fische, Nachtfalter, Weichtiere, Grüne Reihe Des Lebensministeriums. Böhlau Verlag, Wien, pp. 37–60.

Gottfried, M., Pauli, H., Grabherr, G., 1994. Die Alpen im „Treibhaus": Nachweise für das erwärmungsbedingte Höhersteigen der alpinen und nivalen Vegetation. Jahrbuch des Vereins zum Schutz der Bergwelt 59, 13–27.

Gottfried, M., Pauli, H., Reiter, K., Grabherr, G., 1999. A fine-scaled predictive model for changes in species distribution patterns of high mountain plants induced by climate warming. Diversity and Distributions 5, 241–251. doi:10.1046/j.1472-4642.1999.00058.x

Gottfried, M., Hantel, M., Maurer, C., Toechterle, R., Pauli, H., Grabherr, G., 2011. Coincidence of the alpine–nival ecotone with the summer snowline. Environmental Research Letters 6. doi:10.1088/1748-9326/6/1/014013

Gottfried, M., Pauli, H., Futschik, A., Akhalkatsi, M., Barancok, P., Alonso, J.L.B., Coldea, G., Dick, J., Erschbamer, B., Kazakis, G., Krajci, J., Larsson, P., Mallaun, M., Michelsen, O., Moiseev, M., Moiseev, P., Molau, U., Merzouki, A., Nagy, L., Nakhutsrishvili, G., Pedersen, B., Pelino, G., Puscas, M., Rossi, G., Stanisci, J.-P., Theurillat, Tomaselli, Villar, L., Vittoz, P., Vogiatzakis, I., Grabherr, G., 2012. Continent-wide response of mountain vegetation to climate change. Nature Climate Change Letter 2, 111–115. doi:10.1038/nclimate1329

Götzl, M., Schwaiger, E., Sonderegger, G., Süßenbacher, E., 2011. Ökosystemleistungen und Landwirtschaft. Erstellung eines Inventars für Österreich. (No. REP-0355). Umweltbundesamt Wien, Wien, Österreich.

Grabenweger, G., 2007. Ergebnisse des Maiswurzelbohrer– Monitorings 2007, in: Österreichische Arbeitsgemeinschaft für integrierten Pflanzenschutz (Ed.), 48. Österreichische Pflanzenschutztage, 28.-29.11.2007, Mautern a.d. Donau.

Grabherr, G., 1977. Der CO_2-Gaswechsel des immergrünen Zwergstrauches *Loiseleuria procumbens* (L.) Desv. in Abhängigkeit von Strahlung, Temperatur, Wasserstreß und phänologischem Zustand. Photosynthetica 11, 302–310.

Grabherr, G., 1980. Variability and ecology of the alpine dwarf shrub community Loiseleurio-Cetrarietum. Vegetatio 41, 111–120.

Grabherr, G., 1990. On community structure in high alpine grasslands, in: Grabherr, G., Mucina, L., Dale, M.B., Braak, C.J.F.T. (Eds.), Progress in Theoretical Vegetation Science, Advances in Vegetation Science. Springer Netherlands, pp. 223–227.

Grabherr, G., Mucina, L. (Eds.), 1993. Die Pflanzengesellschaften Österreichs. Teil II: Natürliche waldfreie Vegetation. Gustav Fischer Verlag, Jena.

Grabherr, G., Mähr, E., Reisigl, H., 1979. Nettoprimärproduktion und Reproduktion in einem Krummseggenrasen (Caricetum curvulae) der Ötztaler Alpen, Tirol. Oecol. Plant 13, 227–251.

Grabherr, G., Gottfried, M., Pauli, H., 1994. Climate effects on mountain plants. Nature 369, 448–; 448. doi:10.1038/369448a0

Grabherr, G., Gottfried, M., Pauli, H., 2001. Long-Term Monitoring of Mountain Peaks in The Alps, in: Burga, C.A., Kratochvil, A. (Eds.), Biomonitoring: General and Applied Aspects on Regional and Global Scales, Tasks for Vegetation Science. Springer-Science+Business Media, B.V. / Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 153–177.

Graf, W., Waringer, J., Pauls, S., 2007. The subfamily Drusinae (Insecta: Trichoptrea) in Central Europe. Taxonomy-Ecology-Phylogenetics., in: Abstracts: Entomologentagung 2007, Suppl. Universitätsverlag Wagner, Innsbruck, pp. 62–63.

Grafschafter, R., 2007. Experimentelles Wachstum von Moosen auf unterschiedlichem Substrat. Diplomarbeit. Universität Wien.

Grausgruber, H., Sengthaler, K., Kronberger, E., Glauninger, J., 2010. Effects of genotype, environment and crop management on biotic and abiotic stress responses of potato. Poster presented at INRA, 2nd Conference EUCARPIA, 1.-3.12.2010.

Grillitsch, H., Cabela, A., 2001. Reptilien, in: Cabela, A., Grillitsch, H., Tiedemann, F. (Eds.), Atlas zur Verbreitung und Ökologie der Amphibien und Reptilien in Österreich: Auswertung der herpetofaunistischen Datenbank der herpetologischen Sammlung des Naturhistorischen Museums in Wien. Umweltbundesamt, Wien, pp. 442–610.

Groth, W., 1984. Auswirkungen des Stallklimas auf die Gesundheit und die Produktivität von Rindern und Schweinen. Zentralbl Veterinarmed B. 31, 561–584.

Grummer, J., 2009. Einfluß des Klimawandels auf die Tiergesundheit, in: Eitzinger, J., Kersebaum, K.C., Formayer, H. (Eds.), Landwirtschaft Im Klimawandel: Auswirkungen Und Anpassungsstrategien Für Die Land- Und Forstwirtschaft in Mitteleuropa. Agrimedia, Clenze, pp. 219–235.

Grünbacher, E.M., Kromp, B., Formayer, H., Hann, P., 2006. Einflüsse des Klimawandels auf landwirtschaftliche Schädlinge und Nützlinge im Biologischen Landbau Ostösterreichs. (Endbericht zum Projekt StartClim2005. C3-a, Teilprojekt von StartClim2005 „Klimawandel und Gesundheit! No. StartClim2005.C3-a). Wien.

Guisan, A., Thuiller, W., 2005. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. Ecology Letters 8, 993–1009. doi:10.1111/j.1461-0248.2005.00792.x

Guisan, A., Zimmermann, N.E., 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. Ecological Modelling 135, 147–186. doi:10.1016/S0304-3800(00)00354-9

Habel, J.C., Rödder, D., Schmitt, T., Nève, G., 2010. Global warming will affect the genetic diversity and uniqueness of *Lycae-*

na helle populations. Global Change Biology 17, 194–205. doi:10.1111/j.1365-2486.2010.02233.x

Hagedorn, F., Mulder, J., Jandl, R., 2010. Mountain soils under a changing climate and land-use. Biogeochemistry 97, 1–5. doi:10.1007/s10533-009-9386-9

Haines-Young, R., Potschin, M., 2010. The links between biodiversity, ecosystem services and human well-being, in: Raffaelli, D.G., Frid, C. (Eds.), Ecosystem Ecology: A New Synthesis, Ecological Reviews. Cambridge University Press, British Ecological Society, Cambridge; New York, pp. 110–139.

Hance, T., van Baaren, J., Vernon, P., Boivin, G., 2007. Impact of extreme temperatures on parasitoids in a climate change perspective. Annual Review of Entomology 52, 107–126. doi:10.1146/annurev.ento.52.110405.091333

Hanewinkel, M., Cullmann, D.A., Schelhaas, M.-J., Nabuurs, G.-J., Zimmermann, N.E., 2012. Climate change may cause severe loss in the economic value of European forest land. Nature Climate Change 3, 203–207.

Hari, R.E., Livingstone, D.M., Siber, R., Burkhardt-Holm, P., Güttinger, H., 2006. Consequences of climatic change for water temperature and brown trout populations in Alpine rivers and streams. Global Change Biology 12, 10–26. doi:10.1111/j.1365-2486.2005.001051.x

Hasenauer, H., Nemani, R.R., Schadauer, K., Running, S.W., 1999. Forest growth response to changing climate between 1961 and 1990 in Austria. Forest Ecology and Management 122, 209–219. doi:10.1016/S0378-1127(99)00010-9

Hastings, A., Cuddington, K., Davies, K.F., Dugaw, C.J., Elmendorf, S., Freestone, A., Harrison, S., Holland, M., Lambrinos, J., Malvadkar, U., Melbourne, B.A., Moore, K., Taylor, C., Thomson, D., 2005. The spatial spread of invasions: new developments in theory and evidence: Spatial spread of invasions. Ecology Letters 8, 91–101. doi:10.1111/j.1461-0248.2004.00687.x

Hauer, C., Unfer, G., Holzmann, H., Schmutz, S., Habersack, H., 2012. The impact of discharge change on physical instream habitats and its response to river morphology. Climatic Change 116, 827–850. doi:10.1007/s10584-012-0507-4

He, Z., Piceno, Y., Deng, Y., Xu, M., Lu, Z., DeSantis, T., Andersen, G., Hobbie, S.E., Reich, P.B., Zhou, J., 2012. The phylogenetic composition and structure of soil microbial communities shifts in response to elevated carbon dioxide. ISME J 6, 259–272. doi:10.1038/ismej.2011.99

Hegland, S.J., Nielsen, A., Lázaro, A., Bjerknes, A.-L., Totland, Ø., 2009. How does climate warming affect plant-pollinator interactions? Ecology Letters 12, 184–195. doi:10.1111/j.1461-0248.2008.01269.x

Heilig, M., 2007. Klimadiagnose Niederösterreich (Endbericht Mai 2007. No. Auftrag Kennzeichen WA2-A-512/004-2005 vom 21.10.2005.). Amt der NÖ Landesregierung, Abt. Wasserwirtschaft, Abt. Hydrologie, 2007.

Heissenberger, M., Watzke, J., Kainz, M.J., 2010. Effect of nutrition on fatty acid profiles of riverine, lacustrine, and aquaculture-raised salmonids of pre-alpine habitats. Hydrobiologia 650, 243–254. doi:10.1007/s10750-010-0266-z

Henle, K., Dick, D., Harpke, A., Kühn, I., Schweiger, O., Settele, J., 2008. Climate change impacts on European Amphibians and Reptiles. (Report to the Convention on the Conservation of European Wildlife and natural Habitats No. T-PVS/Inf (2008) 11 rev). Strasbourg.

Hering, D., Schmidt-Kloiber, A., Murphy, J., Lücke, S., Zamora-Muñoz, C., López-Rodríguez, M.J., Huber, T., Graf, W., 2009. Potential impact of climate change on aquatic insects: A sensitivity analysis for European caddisflies (Trichoptera) based on distribution patterns and ecological preferences. Aquat. Sci. 71, 3–14. doi:10.1007/s00027-009-9159-5

Herman, F., Smidt, S., Butterbach-Bahl, K., Englisch, M., Gebetsroither, E., Jandl, R., Katzensteiner, K., Lexer, M., Strebl, F., Zechmeister-Boltenstern, S., 2007. Modeling of Nitrogen Dynamics in an Austrian Alpine Forest Ecosystem on Calcareous Soils: A Scenario-Based Risk Assessment under Changing Environmental Conditions. The Scientific World Journal 7, 159–165. doi:10.1100/tsw.2007.9

Heurich, M., Rall, H., 2006. Hochlageninventur 2005 und Luftbildauswertung 2003 bis 2005. Ergebnisse der Untersuchungen zur Waldentwicklung im Nationalpark Bayerischer Wald. Nationalpark Bayerischer Wald., Berichte aus dem Nationalpark 21.

Hilker, N., Rigling, A., Dobbertin, M., 2005. Mehr Misteln wegen der Klimaerwärmung. Wald Holz 86, 39–42.

Hinterholzer, J., 2004. Auswirkungen der Erderwärmung auf die Maisreife. ALVA-Jahrestagung „Klimawandel – Auswirkungen auf Umwelt und Agrarproduktion". Arbeitsgemeinschaft Landwirtschaftlicher Versuchsanstalten (ALVA), Österr. Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit (AGES).

Hirata, M., 1975. Inhibitory effects of antihistamines and antiserotonins on the bone marrow reactions produced by *Escherichia coli* endotoxin in mice. J. Infect. Dis. 132, 611–616.

Hlásny, T., Turčáni, M., 2008. Insect Pests as Climate Change Driven Disturbances in Forest Ecosystems, in: Střelcová, A.P.D.K., Mátyás, P.D.C., Kleidon, D.A., Lapin, P.D.M., Matejka, D.F., Blaženec, D.M., Škvarenina, P.D.J., Holécy, P.D.J. (Eds.), Bioclimatology and Natural Hazards. Springer Netherlands, pp. 165–177.

Hohenwallner, D., Zechmeister, H.G., Moser, D., Pauli, H., Gottfried, M., Reiter, K., Grabherr, G., 2011. Alpine bryophytes as indicators for climate change: a case study from the Austrian Alps., in: Tuba, Z., Slack, N.G., Stark, L.R. (Eds.), Bryophyte Ecology and Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 237–250.

Holtgrieve, G.W., Schindler, D.E., Hobbs, W.O., Leavitt, P.R., Ward, E.J., Bunting, L., Chen, G., Finney, B.P., Gregory-Eaves, I., Holmgren, S., Lisac, M.J., Lisi, P.J., Nydick, K., Rogers, L.A., Saros, J.E., Selbie, D.T., Shapley, M.D., Walsh, P.B., Wolfe, A.P., 2011. A Coherent Signature of Anthropogenic Nitrogen Deposition to Remote Watersheds of the Northern Hemisphere. Science 334, 1545–1548. doi:10.1126/science.1212267

Holzinger, B., Hülber, K., Camenisch, M., Grabherr, G., 2008. Changes in plant species richness over the last century in the eastern Swiss Alps: elevational gradient, bedrock effects and migration rates. Plant Ecology 195, 179–196. doi:10.1007/s11258-007-9314-9

Holzmann, H., Lehmann, T., Formayer, H., Haas, P., 2010. Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf Hochwasser und Wasserhaushaltskomponenten ausgewählter Einzugsgebiete in Österreich. Österr Wasser- und Abfallw 62, 7–14. doi:10.1007/s00506-009-0154-9

Horz, H.-P., Barbrook, A., Field, C.B., Bohannan, B.J.M., 2004. Ammonia-oxidizing bacteria respond to multifactorial global change. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 101, 15136–15141. doi:10.1073/pnas.0406616101

Huemer, M., Glauninger, J., 2010. Der Einfluss unterschiedlicher Temperatur- und Lichtbedingungen auf die Keimfähigkeit der

Giftbeere (*Nicandra physalodes*). Österreichische Pflanzenschutztage, 1.-2.12.2010, Schloss Seggau/Leibnitz.

Hulin, V., Delmas, V., Girondot, M., Godfrey, M.H., Guillon, J.-M., 2009. Temperature-dependent sex determination and global change: are some species at greater risk? Oecologia 160, 493–506. doi:10.1007/s00442-009-1313-1

Huntley, B., Collingham, Y.C., Willis, S.G., Green, R.E., 2008. Potential Impacts of Climatic Change on European Breeding Birds. PLOS ONE 3. doi:10.1371/journal.pone.0001439

Huss, H., 2012. Pilzkrankheiten im Ackerbau – Historischer Rückblick und aktuelle Entwicklungen. Stapfia 96, 195–209.

IPCC, 2014. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Working Group II Contribution to AR5. Volume I & II. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Jackson, S.T., Sax, D.F., 2010. Balancing biodiversity in a changing environment: extinction debt, immigration credit and species turnover. Trends in Ecology & Evolution 25, 153–160. doi:10.1016/j.tree.2009.10.001

Jacobsen, D., Milner, A.M., Brown, L.E., Dangles, O., 2012. Biodiversity under threat in glacier-fed river systems. Nature Climate Change 2, 361–364. doi:10.1038/nclimate1435

Jägerbrand, A.K., Björk, R.G., Callaghan, T., 2011. Effects of climate change on Tundra bryophytes, in: Tuba, Z., Slack, N.G., Stark, L.R. (Eds.), Bryophyte Ecology and Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 211–236.

Janauer, G.A., Hale, P., Sweeting, R. (Eds.), 2003. Macrophyte inventory of the river Danube: A pilot study, Large Rivers. Schweizerbart, Stuttgart.

Jandl, R., 2011. Land use form affects the soil carbon pool – Case study Austria. EGU General Assembly 2011. Geophysical Research Abstracts. 13. EGU2011-3384.

Jandl, R., Gschwandtner, T., Zimmermann, N., 2012. Die künftige Verbreitung der Baumarten im Simulationsmodell. BFW Praxisinformation 30, 16–19.

Jasper, K., Calanca, P., Gyalistras, D., Fuhrer, J., 2004. Differential impacts of climate change on the hydrology of two alpine river basins. Climate Research 26, 113–129.

Jenni, L., Kéry, M., 2003. Timing of autumn bird migration under climate change: advances in long–distance migrants, delays in short–distance migrants. Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences 270, 1467–1471. doi:10.1098/rspb.2003.2394

Jentsch, A., Kreyling, J., Beierkuhnlein, C., 2007. A new generation of climate-change experiments: events, not trends. Frontiers in Ecology and the Environment 5, 365–374. doi:10.1890/1540-9295(2007)5[365:ANGOCE]2.0.CO;2

Jepsen, J.U., Hagen, S.B., Ims, R.A., Yoccoz, N.G., 2008. Climate change and outbreaks of the geometrids *Operophtera brumata* and *Epirrita autumnata* in subarctic birch forest: evidence of a recent outbreak range expansion. Journal of Animal Ecology 77, 257–264. doi:10.1111/j.1365-2656.2007.01339.x

Jolly, W.M., Dobbertin, M., Zimmermann, N.E., Reichstein, M., 2005. Divergent vegetation growth responses to the 2003 heat wave in the Swiss Alps: VEGETATION RESPONSE TO ALPINE HEAT WAVE. Geophysical Research Letters 32. doi:10.1029/2005GL023252

Jones, G.V., White, M.A., Cooper, O.R., Storchmann, K., 2005. Climate Change and Global Wine Quality. Climatic Change 73, 319–343. doi:10.1007/s10584-005-4704-2

Jones, P.D., Lister, D. h., Jaggard, K.W., Pidgeon, J.D., 2003. Future climate impact on the productivity of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) in Europe. Climatic Change 58, 93–108.

Jönsson, A.M., Bärring, L., 2011. Future climate impact on spruce bark beetle life cycle in relation to uncertainties in regional climate model data ensembles. Tellus A 63, 158–173. doi:10.1111/j.1600-0870.2010.00479.x

Jönsson, A.M., Harding, S., Krokene, P., Lange, H., Lindelöw, Å., Økland, B., Ravn, H.P., Schroeder, L.M., 2011. Modelling the potential impact of global warming on *Ips typographus* voltinism and reproductive diapause. Climatic Change 109, 695–718. doi:10.1007/s10584-011-0038-4

Jung, T., Vannini, A., Brasier, C.M., 2009. Progress in understanding *Phytophthora* diseases of trees in Europe 2004-2007, in: Goheen, E.M., Frankel, S.J. (Eds.), Proceedings of the Fourth Meeting of the International Union of Forest Research Organizations (IUFRO) Working Party S07.02.09: Phytophthoras in Forests and Natural ecosystems.General Technical Report. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station, Albany, California, pp. 3–24.

Jungmeier, M., 2010. Untersuchungen über die Viröse Gelbverzwergung (barley yellow dwarf virus) an Wintergerste (*Hordeum vulgare* L.) in der Vegetationsperiode 2008/2009. Masterarbeit. Universität für Bodenkultur, Wien, Österreich.

Jungmeier, M., Lethmayer, C., Glauninger, J., 2009. Das Auftreten verschiedener Blattlausarten in Wintergerste auf dem Versuchsstandort Raasdorf/NÖ in der Vegetationsperiode 2008/09.

Jungmeier, M., Werner, K., Pettrich, C., 2004. Moore in Österreich unter dem Schutz der Ramsar-Konvention. Umweltbundesamt, Wien.

Kahle, H.-P., v.Oijen, Spiecker, H., Ågren, G.I., Chertow, M., Kellomäki, S., Mellert, K., Perez-Martinez, P.-J., Prietzel, J., Straussberger, R., Rehfuess, K.-E., Unseld, R., 2008. Analysis of the relative importance of nutrients, climatic factors, and CO_2 as causes of observed changes in growth, in: Kahle, H.-P., Karjalainen, T., Schuck, A., Ågren, G.I., Kellomäki, S., Mellert, K., Prietzel, J., Rehfuess, K.-E., Spiecker, H. (Eds.), Causes and Consequences of Forest Growth Trends in Europe, European Forest Institute Research Report. Brill, Leiden; Boston.

Kahrer, A., Formayer, H., 2006. Abschätzung des Risikos einer dauerhaften Festsetzung von Gewächshausschädlingen im Freiland als Folge des Klimawandels am Beispiel des Kalifornischen Blütenthripses (*Frankliniella occidentalis*). (StartClim2005.C3b). AGES, Institut für Pflanzengesundheit, Universität für Bodenkultur, Institut für Meteorologie, Wien, Österreich.

Kahrer, A., Formayer, H., 2007. Risiko einer dauerhaften Festsetzung des Kalifornischen Blütenthripses (*Frankliniella occidentalis*) im Freiland als Folge des Klimawandels; 48. Österreichische Pflanzenschutztage, Mautern a. d. Donau, 28.11.2007. AGES - Österreichische Agentur für Gesundheut und Ernährungssicherheit, BOKU - Universität für Bodenkultur, [online].

Kahrer, A., Pilz, C., Egartner, A., Grabenweger, G., Scheifinger, H., Matulla, C., Zuvela-Aloise, M., 2012. Abschätzung des Überwinterungserfolgs exotischer Insekten unter künftigen Klimabedingungen in Österreich. 13. Klimatag, 14.-15.6. 2012. Universität für Bodenkultur, Wien.

Kainz, M., 2011. Untersuchung der Wasser-, Futter- und Fischqualität in Freigewässern und Aquakulturen des NÖ Alpenvorlandes. WasserCluster Lunz, Lunz am See. 35.

Kajfež-Bogataj, L., Bergant, K., Zupančič, B., Črepinšek, Z., Matajc, I., Leskošek, M., Gomboc, S., Robič, D., Bizjak, A., Rogelj, D.,

Uhan, J., Skoberne, P., Cegnar, T., Hočevar, A., 1999. Ocena ranljivosti in strategija prilagoditve ekosistemov na spremembo podnebja v Sloveniji. Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo : Ministrstvo za okolje in prostor : Hidrometeorološki zavod R Slovenije, Ljubljana.

Kammann, C., Grünhage, L., Grüters, U., Janze, S., Jäger, H.-J., 2005. Response of aboveground grassland biomass and soil moisture to moderate long-term CO_2 enrichment. Basic and Applied Ecology 6, 351–365. doi:10.1016/j.baae.2005.01.011

Kammer, A., Hagedorn, F., Shevchenko, I., Leifeld, J., Guggenberger, G., Goryacheva, T., Rigling, A., Moiseev, P., 2009. Treeline shifts in the Ural mountains affect soil organic matter dynamics. Global Change Biology 15, 1570–1583. doi:10.1111/j.1365-2486.2009.01856.x

Karrer, G., Bassler, G., Schume, H., Matthews, B., Willner, W., 2012. Adapting Austrian forestry to climate change: Assessing the drought tolerance of Austria's authochtonous tree species (Final Report No. StartClim2011.D), StartClim2011: Adaption to climate change in Austria: „Forrests“. BMLFUW, BMWF, ÖBf.

Kauserud, H., Heegaard, E., Büntgen, U., Halvorsen, R., Egli, S., Senn-Irlet, B., Krisai-Greilhuber, I., Dämon, W., Sparks, T., Nordén, J., Høiland, K., Kirk, P., Semenov, M., Boddy, L., Stenseth, N.C., 2012. Warming-induced shift in European mushroom fruiting phenology. Proceedings of the National Academy of Sciences 109, 14488–14493. doi:10.1073/pnas.1200789109

Kellomäki, S., Leinonen, S., 2005. Management of European forests under changing climatic conditions: final report of the project „Silvicultural response strategies to climatic change in management of European forests“. University of Joensuu, Joensuu, Finland.

Kersebaum, K.C., Eitzinger, J., 2009. Grundlegende Wirkungsmechanismen im System Boden-Pflanze-Tier-Atmosphäre, in: Eitzinger, J., Kersebaum, K.C., Formayer, H. (Eds.), Landwirtschaft Im Klimawandel: Auswirkungen Und Anpassungsstrategien Für Die Land- Und Forstwirtschaft in Mitteleuropa. Agrimedia, Clenze, Deutschland.

Kersebaum, K.C., Nendel, C., Mirschel, W., Manderscheid, R., H. J. Weigel, Wenkel, K.O., 2009. Testing different CO_2 response algorithms against a face crop rotation experiment and application for climate change impact assessment at different sites in Germany. Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service (Idöjárás) 113, 79–88.

Kettunen, M., Genovesi, P., Gollasch, S., Pagad, S., Starfinger, U., Ten Brink, P., Shine, C., 2009. Technical support to EU strategy on invasive alien species (IAS) - Assessment of the impacts of IAS in Europe and the EU (final module report for the European Commission). (No. Service contract No 070307/2007/483544/MAR/B2). Institute for European Environmental Policy (IEEP), Brussels.

Kienast, F., Wildi, O., Brzeziecki, B., 1998. Potential impacts of climate change on species richness in mountain forests—An ecological risk assessment. Biological Conservation 83, 291–305. doi:10.1016/S0006-3207(97)00085-2

Kirchner, M., Strauss, F., Heumesser, C., Schmid, E., 2012. Integrative model analysis of adaptation measures to a warmer and drier climate. Jahrbuch der Österreichischen Gesellschaft für Agrarökonomie 21, 177–186.

Kirisits, T., 2010. Eingeschleppte Krankheitserreger an Waldbäumen und Klimawandel, in: Rabitsch, W., Essl, F. (Eds.), Aliens: Neobiota und Klimawandel - eine verhängnisvolle Affäre? Verlag Publication PN°1 - Bibliothek der Provinz, Weitra, Österreich, pp. 59–69.

Kirisits, T., Cech, T.L., 2012. Alien pathogens of forest trees in Austria., in: Diez, J.J., Martinez-Álvarez, P., Romeralo, C. (Eds.), Global Change and Forest Diseases: New Threats, New Strategies. Proceedings of the Meeting of IUFRO Working Party 7.02.02. Journal of Agricultural Extension and Rural Development, Montesclaros, Cantabria, Spain, pp. 227–229.

Klanderud, K., Birks, H.J.B., 2003. Recent increases in species richness and shifts in altitudinal distributions of Norwegian mountain plants. The Holocene 13, 1–6. doi:10.1191/0959683603hl589ft

Klaveness, D., Lindstrøm, E.-A., 2011. *Hydrurus foetidus* (Chromista, Chrysophyceae): A large freshwater chromophyte alga in laboratory culture. Phycological Research 59, 105–112. doi:10.1111/j.1440-1835.2010.00606.x

Kleewein, A., Wöss, G., 2010. Niedliche Tierchen als ökologischer Zündstoff: Über faunenfremde Schildkröten in Österreich, in: Rabitsch, W., Essl, F. (Eds.), Aliens: Neobiota und Klimawandel – eine verhängnisvolle Affäre? Bibliothek der Provinz, Weitra, pp. 105–111.

Kliejunas, J.T., Geils, B.W., Glaeser, J.M., Goheen, E.M., Hennon, P., Kim, M.-S., Kope, H., Stone, J., Sturrock, R., Frankel, S.J., 2009. Review of Literature on Climate Change and Forest Diseases of Western North America (General Technical Report No. PSW-GTR-225). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station., Albany CA, USA.

Klik, A., Eitzinger, J., 2010. Impact of climate change on soil erosion and the efficiency of soil conservation practices in Austria. The Journal of Agricultural Science 148, 529–541. doi:10.1017/S0021859610000158

Knudsen, E., Lindén, A., Both, C., Jonzén, N., Pulido, F., Saino, N., Sutherland, W.J., Bach, L.A., Coppack, T., Ergon, T., Gienapp, P., Gill, J.A., Gordo, O., Hedenström, A., Lehikoinen, E., Marra, P.P., Møller, A.P., Nilsson, A.L.K., Péron, G., Ranta, E., Rubolini, D., Sparks, T.H., Spina, F., Studds, C.E., Sæther, S.A., Tryjanowski, P., Stenseth, N.C., 2011. Challenging claims in the study of migratory birds and climate change. Biological Reviews 86, 928–946. doi:10.1111/j.1469-185X.2011.00179.x

Koch, E., 2000. Phenology in Austria. Phenological Mapping, Long-Term Trends. Selected Papers from the Conference ICB - ICUC 2000, Sydney 8 – 12 November 1999. WMO / TD No. 1026, Genf.

Koch, E., 2008. Datenquellen: Burgunder Daten: Chuine, I., Yiou, P., Viovy, N. et al.: Historical phenology: Grape ripening as a climate indicator, Nature, 432, 289-290, 2004. Schweizer Daten: Meier, N., Ruthishauser, T., Pfister, C., Wanner, H., Luterbacher, J.: Grape harvest dates as a proxy for Swiss April to August temperature reconstruction back to A. D. 1480, Geophys. Res. Lett., 34, L20705, doi: 10.1029/2007GL031381, 2007. Moderne Klosterneuburger und Wiener Daten: Sommer, M.: Zusammenfassung der Analysenkenndaten von authentischen Weinen verschiedener Jahrgänge und deren weinbaulich-klimatische Interpretation. Diplomarbeit aus den Fachgegenständen Chemie der Früchte und Fruchtprodukte Mathematik. Lehr- und Forschungszentrum für Wein- und Obstbau Klosterneuburg, 2008. Historische Klosterneuburger und Bürgerspitaldaten: Dr. Hammerl; Quelle: ZAMG.

Köckinger, H., Kučera, J., Hofmann, H., Müller, N., Amann, G., 2012b. *Barbula consanguinea* Discovered in Switzerland and Austria, with a Revision of Former European Records of *B. indica.* Herzogia 25, 61–70. doi:10.13158/heia.25.1.2010.61

Köckinger, H., Schröck, C., Krisai, R., Zechmeister, H.G., 2012a. Checkliste der Moose Österreichs [WWW Document]. URL http://131.130.59.133/projekte/moose/

Kocmánková, E., Trnka, M., Eitzinger, J., Formayer, H., Dubrovsky, M., Semerádová, D., Zalud, Z., Juroch, J., Mozny, M., 2010. Estimating the impact of climate change on the occurrence of selected pests in the Central European region. Climate Research 44, 95–105. doi:10.3354/cr00905

Koinig, K.A., Kamenik, C., Schmidt, R., Agustí-Panareda, A., Appleby, P., Lami, A., Prazakova, M., Rose, N., Schnell, Ø.A., Tessadri, R., Thompson, R., Psenner, R., 2002. Environmental changes in an alpine lake (Gossenköllesee, Austria) over the last two centuries – the influence of air temperature on biological parameters. Journal of Paleolimnology 28, 147–160. doi:10.1023/A:1020332220870

Koinig, K.A., Schmidt, R., Sommaruga-Wögrath, S., Tessadri, R., Psenner, R., 1998. Climate Change as the Primary Cause for pH Shifts in a High Alpine Lake. Water, Air, & Soil Pollution 104, 167–180. doi:10.1023/A:1004941013924

Kölling, C., 2007. Klimahüllen für 27 Waldbaumarten. AFZ/Der-Wald 62, 1242–1245.

Köpke, U., Haas, G., 1995. Vergleich konventioneller und organischer Landbau - Teil II: Klimarelevante Kohlendioxid-Senken von Pflanzen und Boden. Berichte über Landwirtschaft: Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft. 73, 416–434.

Koranda, M., Kerschbaum, S., Wanek, W., Zechmeister, H., Richter, A., 2007. Physiological Responses of Bryophytes *Thuidium tamariscinum* and *Hylocomium splendens* to Increased Nitrogen Deposition. Annals of Botany 99, 161–169. doi:10.1093/aob/mcl239

Körner, C., Ohsawa, M., 2006. Mountain systems, in: Hassan, R., Scholes, R., Ash, N. (Eds.), Ecosystems and Human Well-Being: Current State and Trends, Volume 1, Millennium Ecosystem Assessment. Island Press, Washington, Covelo, London, pp. 681–716.

Kosten, S., Huszar, V.L.M., Bécares, E., Costa, L.S., van Donk, E., Hansson, L.-A., Jeppesen, E., Kruk, C., Lacerot, G., Mazzeo, N., De Meester, L., Moss, B., Lürling, M., Nõges, T., Romo, S., Scheffer, M., 2012. Warmer climates boost cyanobacterial dominance in shallow lakes. Global Change Biology 18, 118–126. doi:10.1111/j.1365-2486.2011.02488.x

Kovats, R.S., Edwards, S.J., Hajat, S., Armstrong, B.G., Ebi, K.L., Menne, B., 2004. The effect of temperature on food poisoning: a time-series analysis of salmonellosis in ten European countries. Epidemiology and Infection 132, 443–453. doi:10.1017/S0950268804001992

Kowalchuk, G.A., Stephen, J.R., 2001. AMMONIA-OXIDIZING BACTERIA: A Model for Molecular Microbial Ecology. Annual Review of Microbiology 55, 485–529. doi:10.1146/annurev.micro.55.1.485

Krehan, H., Cech, T.L., 1998. Pine decline in Austria, in: Cech, T.L., Hartmann, G., Tomiczek, C. (Eds.), Disease/environment Interactions in Forest Decline: Proceedings of a Workshop of the Working Party, Disease/Environment Interactions in Forest Decline, IUFRO 7.02.06: Vienna, Austria, March 16-21, 1998. Federal Forest Research Centre, pp. 83–93.

Kreitmayr, J., Mayr, K., 2007. Auswirkungen und Strategien für Landwirtschaft und Umwelt - aus der Sicht der Bodenbearbeitung, in: LfL (Ed.), Klimaänderung und Landwirtschaft: Bestandsaufnahme Und Handlungsstrategien Für Bayern; Tagungsband, Schriftenreihe Der Bayerischen Landesanstalt Für Landwirtschaft. Presented at the 6. Kulturlandschaftstag, Freising-Weihenstephan: LfL, Freising-Weihenstephan. LfL, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, pp. 71–87.

Krenn, S., 2007. Untersuchungen zum Voltinismus und der Entwicklung des Buchdruckers in montanen und subalpinen Fichtenwäldern der Steiermark. Diplomarbeit. Universität für Bodenkultur, Wien, Österreich.

Kreuter, T., 2007. Auswirkungen und Strategien für Landwirtschaft und Umwelt – aus der Sicht der Agrarfauna, in: LfL (Ed.), Klimaänderung Und Landwirtschaft: Bestandsaufnahme und Handlungsstrategien für Bayern; Tagungsband, Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft. Presented at the 6. Kulturlandschaftstag, Freising-Weihenstephan: LfL, Freising-Weihenstephan. LfL, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, pp. 71–87.

Krisai-Greilhuber, I., Kraus, G.F., 2013. Definition und Abgrenzung der Pilze, in: Hinker, M., Seibert, M. (Eds.), Pilze in Innenräumen und am Arbeitsplatz. Springer Vienna, pp. 1–15.

Kromp-Kolb, H., Gerersdorfer, T., 2003. Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Tierwelt – derzeitiger Wissensstand, fokussiert auf den Alpenraum und Österreich (Endbericht. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft No. Projekt GZ 54 3895/171-V/4/02). Institut für Meteorologie und Physik, Universität für Bodenkultur, Wien.

Kühn, I., Vohland, K., Badeck, F., Hanspach, J., Pompe, S., Klotz, S., 2009. Aktuelle Ansätze zur Modellierung der Auswirkungen von Klimaänderungen auf die biologische Vielfalt. Natur und Landschaft 84, 8–12.

Kullman, L., 2010. Alpine flora dynamics - a critical review of responses to climate change in the Swedish Scandes since the early 1950s. Nordic Journal of Botany 28, 398–408. doi:10.1111/j.1756-1051.2010.00812.x

Kumschick, S., Fronzek, S., Entling, M.H., Nentwig, W., 2011. Rapid spread of the wasp spider *Argiope bruennichi* across Europe: a consequence of climate change? Climatic Change 109, 319–329. doi:10.1007/s10584-011-0139-0

Kyek, M., Pintar, M., Formayer, H., 2003. Amphibien, in: Kromp-Kolb, H. (Ed.), Auswirkungen von Klimaänderungen Auf Die Tierwelt – Derzeitiger Wissensstand, Fokussiert Auf Den Alpenraum Und Österreich. Endbericht Projekt GZ 54 3895/171-V/4/02. Im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.

La Porta, N., Capretti, P., Thomsen, I.M., Kasanen, R., Hietala, A.M., Von Weissenberg, K., 2008. Forest pathogens with higher damage potential due to climate change in Europe. Canadian Journal of Plant Pathology 30, 177–195. doi:10.1080/07060661.2008.10540534

Lange, H., Økland, B., Krokene, P., 2006. Thresholds in the life cycle of the spruce bark beetle under climate change. Interjournal for Complex Systems.

Langford, T.E., 1990. Ecological Effects of Thermal Discharges. Elsevier Applied Science Publishers Ltd, London, New York.

Larcher, W., 1994. Ökophysiologie der Pflanzen: Leben, Leistung und Stressbewältigung der Pflanzen in ihrer Umwelt, 5th ed. Verlag Eugen Ulmer bei UTB, Stuttgart.

Larcher, W., 2003. Physiological Plant Ecology - Ecophysiology and Stress Physiology of Functional Groups, 4th ed. ed. Springer.

Larcher, W., Wagner, J., 2004. Lebensweise der Alpenrosen in ihrer Umwelt: 70 Jahre ökophysiologische Forschung in Innsbruck (No. 91). Ber. nat.-med. Verein Innsbruck, Innsbruck.

Lehsten, D., Dullinger, S., Hülber, K., Schurgers, G., Cheddadi, R., Laborde, H., Lehsten, V., François, L., Dury, M., Sykes, M.T., in revision. Modelling the Holocene migrational dynamics of Fagus sylvatica L. and Picea abies (L.) H. Karst. Global Ecol Biogeo 23, 658-668. Vgl. http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/geb.12145/abstract

Leuzinger, S., Luo, Y., Beier, C., Dieleman, W., Vicca, S., Körner, C., 2011. Do global change experiments overestimate impacts on terrestrial ecosystems? Trends in Ecology & Evolution 26, 236–241. doi:10.1016/j.tree.2011.02.011

Lexer, M.J., 2001. Simulation der potentiellen natürlichen Vegetation für Österreichs Wälder: Vergleich von statischen und dynamischen Modellkonzepten, Forstliche Schriftenreihe. Österreichische Gesellschaft für Waldökosystemforschung und experimentelle Baumforschung-Universität für Bodenkultur, Wien.

Lexer, M.J., Hönninger, K., 2001. A modified 3D-patch model for spatially explicit simulation of vegetation composition in heterogeneous landscapes. Forest ecology and management 144, 43–65.

Lexer, M.J., Hönninger, K., Scheifinger, H., Matulla, C., Groll, N., Kromp-Kolb, H., Schadauer, K., Starlinger, F., Englisch, M., 2002. The sensitivity of Austrian forests to scenarios of climatic change: a large-scale risk assessment based on a modified gap model and forest inventory data. Forest Ecology and Management, National and Regional Climate Change Impact Assessments in the Forestry Sector 162, 53–72. doi:10.1016/S0378-1127(02)00050-6

Lindner, M., Garcia-Gonzalo, J., Kolström, M., Green, T., Reguera, R., Maroschek, M., Seidl, R., Lexer, M.J., Netherer, S., Schopf, A., Kremer, A., Delzon, S., Barbati, A., Marchetti, M., Corona, P., 2008. Impacts of Climate Change on European Forests and Options for Adaptation (Report to the European Commissi on Directorate-General for Agriculture and Rural Development No. AGRI-2007-G4-06).

Lines, J., 1995. The effects of climatic and land-use changes on insect vectors of human disease, in: Harrington, R., Stork, N.E. (Eds.), Insects in a Changing Environment. Academic Press, London, pp. 158–175.

Lips, K.R., Diffendorfer, J., Mendelson, J.R., Sears, M.W., 2008. Riding the Wave: Reconciling the Roles of Disease and Climate Change in Amphibian Declines. PLoS Biology 6. doi:10.1371/journal.pbio.0060072

MacLeod, A., Pautasso, M., Jeger, M.J., Haines-Young, R., 2010. Evolution of the international regulation of plant pests and challenges for future plant health. Food Security 2, 49–70. doi:10.1007/s12571-010-0054-7

Mäder, P., Fliessbach, A., Dubois, D., Gunst, L., Fried, P., Niggli, U., 2002. Soil fertility and biodiversity in organic farming. Science 296, 1694–1697. doi:10.1126/science.1071148

Maiorano, L., Falcucci, A., Zimmermann, N.E., Psomas, A., Pottier, J., Baisero, D., Rondinini, C., Guisan, A., Boitani, L., 2011. The future of terrestrial mammals in the Mediterranean basin under climate change. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences 366, 2681–2692. doi:10.1098/rstb.2011.0121

Marini, L., Ayres, M.P., Battisti, A., Faccoli, M., 2012. Climate affects severity and altitudinal distribution of outbreaks in an eruptive bark beetle. Climatic Change 115, 327–341. doi:10.1007/s10584-012-0463-z

Maroschek, M.G., 2009. How vulnerable is the protective function of Austria's mountain forests under climate change? A qualitative vulnerability assessment for protective forests in three selected regions. (Diplomarbeit). Institut für Waldbau, Universität für Bodenkultur, Wien.

Maroschek, M.G., Lexer, M., 2010. Österreichs Wald im Treibhaus: Nicht heimische Bäume als Lösung?, in: Rabitsch, W., Essl, F. (Eds.), Aliens: Neobiota und Klimawandel - eine verhängnisvolle Affäre? Bibliothek der Provinz, Weitra, Österreich, pp. 105–113.

Masclaux, H., Bec, A., Kainz, M.J., Desvilettes, C., Jouve, L., Bourdier, G., 2009. Combined effects of food quality and temperature on somatic growth and reproduction of two freshwater cladocerans. Limnology and Oceanography 54, 1323.

Matulla, C., Schmutz, S., Melcher, A., Gerersdorfer, T., Haas, P., Dezember 1, 2007. Assessing the impact of a downscaled climate change simulation on the fish fauna in an Inner-Alpine River. Int J Biometeorol 52, 127–137. doi:10.1007/s00484-007-0107-6

McGregor, G., Petts, G.E., Gurnell, A.M., Milner, A.M., 1995. Sensitivity of alpine stream ecosystems to climate change and human impacts. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems 5, 233–247. doi:10.1002/aqc.3270050306

McMenamin, S.K., Hadly, E.A., Wright, C.K., 2008. Climatic change and wetland desiccation cause amphibian decline in Yellowstone National Park. Proceedings of the National Academy of Sciences 105, 16988–16993. doi:10.1073/pnas.0809090105

McMenamin, S.K., Hadly, E.A., Wright, C.K., 2008. Climatic change and wetland desiccation cause amphibian decline in Yellowstone National Park. Proceedings of the National Academy of Sciences 105, 16988–16993. doi:10.1073/pnas.0809090105

McVittie, A., Hussain, S.S., 2013. The Economics of Ecosystems and Biodiversity – Valuation Database Manual.

MEA, 2005. Ecosystems and Human Well-being: General Synthesis. Island Press, Washington, DC, USA.

Measey, G.J., Rödder, D., Green, S.L., Kobayashi, R., Lillo, F., Lobos, G., Rebelo, R., Thirion, J.-M., 2012. Ongoing invasions of the African clawed frog, *Xenopus laevis*: a global review. Biol Invasions 14, 2255–2270. doi:10.1007/s10530-012-0227-8

Meier, E.S., Lischke, H., Schmatz, D.R., Zimmermann, N.E., 2012. Climate, competition and connectivity affect future migration and ranges of European trees: Future migration and ranges of European trees. Global Ecology and Biogeography 21, 164–178. doi:10.1111/j.1466-8238.2011.00669.x

Melcher, A., Pletterbauer, F., Schmutz, S., 2010. Mögliche Auswirkungen der Klimaänderung auf die Fische in Österreichs Flüssen. Welche Anpassungs-erscheinungen zeichnen sich dabei ab?, in: Tagungsband Des 11. Österreichischer Klimatag, „Klima Im Wandel, Auswirkungen Und Strategien" Am 11. Und 12. März 2010. Klimaforschungsinitiative AustroClim, Universität für Bodenkultur, Wien.

Melis, C., Szafrańska, P.A., Jędrzejewska, B., Bartoń, K., 2006. Biogeographical variation in the population density of wild boar (*Sus scrofa*) in western Eurasia. Journal of Biogeography 33, 803–811. doi:10.1111/j.1365-2699.2006.01434.x

Menzel, A., Sparks, T.H., Estrella, N., Koch, E., Aasa, A., Ahas, R., Alm-KüBler, K., Bissolli, P., Braslavská, O., Briede, A., Chmielewski, F.M., Crepinsek, Z., Curnel, Y., Dahl, A., Defila, C., Donnelly, A., Filella, Y., Jatczak, K., Måge, F., Mestre, A., Nordli, øYvind, Peñuelas, J., Pirinen, P., Remišová, V., Scheifinger, H., Striz, M., Susnik, A., Van Vliet, A.J.H., Wielgolaski, F.-E., Zach, S., Zust, A., 2006. European phenological response to climate change matches the warming pattern. Global Change Biology 12, 1969–1976. doi:10.1111/j.1365-2486.2006.01193.x

Meyer, J.L., Sale, M.J., Mulholland, P.J., Poff, N.L., 1999. Impacts of Climate Change on Aquatic Ecosystem Functioning and Health1.

JAWRA Journal of the American Water Resources Association 35, 1373–1386. doi:10.1111/j.1752-1688.1999.tb04222.x
Miller-Rushing, A.J., Lloyd-Evans, T.L., Primack, R.B., Satzinger, P., 2008. Bird migration times, climate change, and changing population sizes. Global Change Biology 14, 1959–1972. doi:10.1111/j.1365-2486.2008.01619.x
Mills, G.C., Alperin, J.B., Trimmer, K.B., 1975. Studies on variant glucose-6-phosphate dehydrogenases: G6PD Fort Worth. Biochem Med 13, 264–275.
Moiseev, P.A., Shiyatov, S.G., 2003. Vegetation Dynamics at the Treeline Ecotone in the Ural Highlands, Russia, in: Nagy, L., Grabherr, G., Körner, C., Thompson, D.B.A. (Eds.), Alpine Biodiversity in Europe, Ecological Studies. Springer, Berlin, pp. 423–435.
Moore, B.A., Allard, G.B., 2008. Climate change impacts on forest health (Forest Health & Biosecurity Working Papers FBS/34E), Forest Resources Development Service. Forest Management Division, FAO, Rome.
Moser, D., Dullinger, S., Englisch, T., Niklfeld, H., Plutzar, C., Sauberer, N., Zechmeister, H.G., Grabherr, G., 2005. Environmental determinants of vascular plant species richness in the Austrian Alps. Journal of Biogeography 32, 1117–1127. doi:10.1111/j.1365-2699.2005.01265.x
Mucina, L., Grabherr, G., Ellmauer, T., Wallnöfer (Eds.), 1993. Die Pflanzengesellschaft Österreichs: Teil I: Anthropogene Vegetation. Teil II: Natürliche waldfreie Vegetation.Teil III: Wälder und Gebüsche. Verlag Gustav Fischer, Jena, Stuttgart, New York.
Muster, C., Herrmann, A., Otto, S., Bernhard, D., 2008. Zur Ausbreitung humanmedizinisch bedeutsamer Dornfinger-Arten *Cheiracanthium mildei* und *C. punctorium* in Sachsen und Brandenburg (Araneae: Miturgidae). Arachnologische Mitteilungen 35, 13–20. doi:10.5431/aramit3502
Nathan, R., Horvitz, N., He, Y., Kuparinen, A., Schurr, F.M., Katul, G.G., 2011. Spread of North American wind-dispersed trees in future environments: Spread of wind-dispersed trees. Ecology Letters 14, 211–219. doi:10.1111/j.1461-0248.2010.01573.x
Naucke, T.J., Lorentz, S., Rauchenwald, F., Aspöck, H., 2011. *Phlebotomus Transphlebotomus mascittii* Grassi, 1908, in Carinthia: first record of the occurrence of sandflies in Austria (Diptera: Psychodidae: Phlebotominae). Parasitol Res 109, 1161–1164. doi:10.1007/s00436-011-2361-0
Netherer, S., Schopf, A., 2010. Potential effects of climate change on insect herbivores in European forests – General aspects and the pine processionary moth as specific example. Forest Ecology and Management 259, 831–838. doi:10.1016/j.foreco.2009.07.034
Neveu, A., 2009. Incidence of climate on common frog breeding: Long-term and short-term changes. Acta Oecologica 35, 671–678. doi:10.1016/j.actao.2009.06.012
Nicol, G.W., Leininger, S., Schleper, C., Prosser, J.I., 2008. The influence of soil pH on the diversity, abundance and transcriptional activity of ammonia oxidizing archaea and bacteria. Environmental Microbiology 10, 2966–2978. doi:10.1111/j.1462-2920.2008.01701.x
Nicolussi, K., Patzelt, G., 2006. Klimawandel und Veränderungen an der alpinen Waldgrenze - aktuelle Entwicklungen im Vergleich zur Nacheiszeit. BFW-Praxisinformation 10, 3–5.
Nieder, R., Benbi, D.K., Isermann, K., 2003. Soil organic matter dynamics, in: Benbi, D.K., Nieder, R. (Eds.), Handbook of Processes and Modeling in the Soil-Plant System. Haworth Reference Press, New York, pp. 345–408.
Niedermair, M., Lexer, M.J., Plattner, G., Formayer, H., Seidl, R., 2007. Klimawandel und Artenvielfalt - Wie klimafit sind Österreichs Wälder, Flüsse und Alpenlandschaften? Österreichischen Bundesforste AG, Universität für Bodenkultur Wien, WWF.
Niedermair, M., Platterer, G., Egger, G., Essl, F., Kohler, B., Zika, M., 2011. Moore im Klimawandel. Studie des WWF Österreich, der Österreichischen Bundesforste und des Umweltbundesamtes.
Nienaber, J.A., Hahn, G.L., Eigenberg, R.A., 1999. Quantifying livestock responses for heat stress management: a review. International Journal of Biometeorology 42, 183–188.
Nierhaus-Wunderwald, D., Lawrenz, P., 1997. Zur Biologie der Mistel (Merkblätter zum Thema Forstschutz No. 28), Merkblatt für die Praxis. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf, Schweiz.
Niese, G., 2011. Österreichs Schutzwälder sind total überaltert. BFW-Praxisinformation 24, 29–31.
Niggli, U., Earley, J., Ogorzalek, K., 2007. Organic agriculture and food supply stability. Ecological and environmental stability of the food supply, in: Proceedings of the International Conference on Organic Agriculture and Food Security. FAO, Rome.
Niinemets, Ü., 2010. Responses of forest trees to single and multiple environmental stresses from seedlings to mature plants: Past stress history, stress interactions, tolerance and acclimation. Forest Ecology and Management 260, 1623–1639. doi:10.1016/j.foreco.2010.07.054
Niinemets, Ü., Valladares, F., 2006. Tolerance to shade, drought and waterlogging of temperate northern hemisphere trees and shrubs. Ecological Monographs 76, 521–547. doi:10.1890/0012-9615(2006)076[0521:TTSDAW]2.0.CO;2
Niklfeld, H., Schratt-Ehrendorfer, L., Englisch, T., 2008. Muster der Artenvielfalt der Farn-und Blütenpflanzen in Österreich, in: Sauberer, N., Moser, D., Grabherr, G. (Eds.), Biodiversität in Österreich: Räumliche Muster Und Indikatoren Der Arten- Und Lebensraumvielfalt. Haupt Verlag, Bern, pp. 87–102.
Nõges, P., Adrian, R., Anneville, O., Arvola, L., Blenckner, T., George, G., Jankowski, T., Järvinen, M., Maberly, S., Padisák, J., Straile, D., Teubner, K., Weyhenmeyer, G., 2010. The Impact of Variations in the Climate on Seasonal Dynamics of Phytoplankton, in: George, G. (Ed.), The Impact of Climate Change on European Lakes, Aquatic Ecology Series. Springer Netherlands, pp. 253–274.
Norby, R.J., Wullschleger, S.D., Gunderson, C.A., Johnson, D.W., Ceulemans, R., 1999. Tree responses to rising CO_2 in field experiments: implications for the future forest. Plant, Cell & Environment 22, 683–714. doi:10.1046/j.1365-3040.1999.00391.x
Nösberger, J., Lüscher, A., 1995. CO_2 – Die Zukunft gehört dem Klee. Die Grüne 23/95.
Obertegger, U., Camin, F., Guella, G., Flaim, G., 2011. Adaptation of a Psychrophilic Freshwater Dinoflagellate to Ultraviolet Radiation1. Journal of Phycology 47, 811–820. doi:10.1111/j.1529-8817.2011.01025.x
Olesen, J.E., Bindi, M., 2002. Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. European Journal of Agronomy 16, 239–262. doi:10.1016/S1161-0301(02)00004-7
Ostermaier, V., Schanz, F., Köster, O., Kurmayer, R., 2012. Stability of toxin gene proportion in red-pigmented populations of the cyanobacterium *Planktothrix* during 29 years of re-oligotrophication of Lake Zürich. BMC Biology 10. doi:10.1186/1741-7007-10-100
Österreichische Mykologische Gesellschaft (ÖMG), 2013. Datenbank der Pilze Österreichs. Bearbeitet von Dämon, W., Hauskne-

cht, A. und Krisai-Greilhuber, I. [WWW Document]. URL http://austria.mykodata.net/ (accessed 5.8.13).

Ott, J., 2008. Libellen als Indikatoren der Klimaänderung–Ergebnisse aus Deutschland und Konsequenzen für den Naturschutz. Insecta–Zeitschrift für Entomologie und Naturschutz 11, 75–89.

Ott, J., 2010. Dragonflies and climatic change - recent trends in Germany and Europe. BIORISK – Biodiversity and Ecosystem Risk Assessment 5, 253–286. doi:10.3897/biorisk.5.857

Parmesan, C., 2007. Influences of species, latitudes and methodologies on estimates of phenological response to global warming. Global Change Biology 13, 1860–1872. doi:10.1111/j.1365-2486.2007.01404.x

Parmesan, C., Yohe, G., 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. Nature 421, 37–42. doi:10.1038/nature01286

Paul, V.J., 2008. Global warming and cyanobacterial harmful algal blooms, in: Hudnell, H.K. (Ed.), Cyanobacterial Harmful Algal Blooms: State of the Science and Research Needs, Advances in Experimental Medicine and Biology. Springer, New York, pp. 239–257.

Pauli, H., Gottfried, M., Grabherr, G., 2001. High summits of the Alps in a changing climate, in: Walther, G.-R., Burga, C.A., Edwards, P.J. (Eds.), „Fingerprints" of Climate Change. Adapted Behaviour and Shifting Species Ranges. Springer, US, pp. 139–149.

Pauli, H., Gottfried, M., Dirnböck, T., Dullinger, S., Grabherr, G., 2003. Assessing the long-term dynamics of endemic plants at summit habitats, in: Nagy, L., Grabherr, G., Körner, C., Thompson, D.B.A. (Eds.), Alpine Biodiversity in Europe, Ecological Studies. Springer, Berlin Heidelberg, pp. 195–207.

Pauli, H., Gottfried, M., Reiter, K., Klettner, C., Grabherr, G., 2007. Signals of range expansions and contractions of vascular plants in the high Alps: observations (1994–2004) at the GLORIA master site Schrankogel, Tyrol, Austria. Global Change Biology 13, 147–156. doi:10.1111/j.1365-2486.2006.01282.x

Pauli, H., Gottfried, M., Dullinger, S., Abdaladze, O., Akhalkatsi, M., Alonso, J.L.B., Coldea, G., Dick, J., Erschbamer, B., Calzado, R.F., Ghosn, D., Holten, J.I., Kanka, R., Kazakis, G., Kollár, J., Larsson, P., Moiseev, P., Moiseev, D., Molau, U., Mesa, J.M., Nagy, L., Pelino, G., Puşcaş, M., Rossi, G., Stanisci, A., Syverhuset, A.O., Theurillat, J.-P., Tomaselli, M., Unterluggauer, P., Villar, L., Vittoz, P., Grabherr, G., 2012. Recent Plant Diversity Changes on Europe's Mountain Summits. Science 336, 353–355. doi:10.1126/science.1219033

Pearson, R.G., Dawson, T.P., 2003. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? Global Ecology and Biogeography 12, 361–371. doi:10.1046/j.1466-822X.2003.00042.x

Peltonen-Sainio, P., Jauhiainen, L., Trnka, M., Olesen, J.E., Calanca, P., Eckersten, H., Eitzinger, J., Gobin, A., Kersebaum, K.C., Kozyra, J., Kumar, S., Marta, A.D., Micale, F., Schaap, B., Seguin, B., Skjelvag, A.O., Orlandini, S., 2010. Coincidence of variation in yield and climate in Europe. Agriculture, Ecosystems & Environment 139, 483–489. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2010.09.006

Perkins, D.M., Reiss, J., Yvon-Durocher, G., Woodward, G., 2010. Global change and food webs in running waters. Hydrobiologia 657, 181–198. doi:10.1007/s10750-009-0080-7

Perzl, F., Kammerlander, J., 2010. Schneehöhe und Lawinengefahr einst und im Jahre Schnee? BFW Praxisinformation 23, 8–10.

Petersen, H., Luxton, M., 1982. A Comparative Analysis of Soil Fauna Populations and Their Role in Decomposition Processes. Oikos 39, 287–388. doi:10.2307/3544689

Petgen, M., 2007. Reaktion der Reben auf den Klimawandel. Schweizerischen Zeitschrift für Obst-und Weinbau 9, 6–9.

Phillimore, A.B., Hadfield, J.D., Jones, O.R., Smithers, R.J., 2010. Differences in spawning date between populations of common frog reveal local adaptation. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 107, 8292–8297. doi:10.1073/pnas.0913792107

Pilz, C., Kahrer, A., 2012. Maiswurzelbohrer: Bisher keine Ausbreitung, aber deutlich mehr Käfer. Der Pflanzenarzt.

Pimentel, D., Hepperly, P., Hanson, J., Douds, D., Seidel, R., 2005. Environmental, energetic, and economic comparisons of organic and conventional farming systems. BioScience 55, 573–582. doi:http://dx.doi.org/10.1641/0006-3568(2005)055[0573:EEAECO]2.0.CO;2

Poczopko, P., 1984. The zone of optimal temperature as related to age of domesticated animals. Archiv für experimentelle Veterinärmedizin 38, 411–418.

Pompe, S., Berger, S., Bergmann, J., Badeck, F., Lübbert, J., Klotz, S., Rehse, A.-K., Söhlke, G., Sattler, S., Walther, G.-R., Kühn, I., 2011. Modellierung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Flora und Vegetation in Deutschland (No. 304), BfN-Skripten. Bundesamt für Naturschutz (BfN), Bonn.

Pötsch, E.M., 1998. Über den Einfluss der Düngungsintensität auf den N-Kreislauf im alpenländischen Grünland. Die Bodenkultur 49, 19–27.

Pötsch, E.M., 2012. Optimale Grünlandbewirtschaftung in Bergregionen. (Tagungsbericht zur 39. Viehwirtschaftlichen Fachtagung „Milchproduktion – status quo und Anpassung an zukünftige Herausforderungen"). LFZ Raumberg-Gumpenstein.

Pounds, J.A., Bustamante, M.R., Coloma, L.A., Consuegra, J.A., Fogden, M.P.L., Foster, P.N., La Marca, E., Masters, K.L., Merino-Viteri, A., Puschendorf, R., Ron, S.R., Sánchez-Azofeifa, G.A., Still, C.J., Young, B.E., 2006. Widespread amphibian extinctions from epidemic disease driven by global warming. Nature 439, 161–167. doi:10.1038/nature04246

Pöyry, J., Luoto, M., Heikkinen, R.K., Kuussaari, M., Saarinen, K., 2009. Species traits explain recent range shifts of Finnish butterflies. Global Change Biology 15, 732–743. doi:10.1111/j.1365-2486.2008.01789.x

Pretzsch, U., Utschig, H., 2000. Wachstumstrends der Fichte in Bayern. Mitteilungen aus der Bayerischen Staatsforstverwaltung 49, 170.

Pröll, G., Dullinger, S., Dirnböck, T., Kaiser, C., Richter, A., 2011. Effects of nitrogen on tree recruitment in a temperate montane forest as analysed by measured variables and Ellenberg indicator values. Preslia 83, 111–127.

Psenner, R., 2002. Alpine waters in the interplay of global change. Complex links – simple effects, in: Steininger, K.W., Weck-Hannemann, H. (Eds.), Global Environmental Change in Alpine Regions: Recognition, Impact, Adaptation and Mitigation. Edward Elgar Publishing, Cheltenham, U.K, pp. 15–40.

Purse, B.V., Mellor, P.S., Rogers, D.J., Samuel, A.R., Mertens, P.P., Baylis, M., 2005. Climate change and the recent emergence of bluetongue in Europe. Nature Reviews Microbiology 3, 171–181. doi:10.1038/nrmicro1090

Queyriaux, B., Armengaud, A., Jeannin, C., Couturier, E., Peloux-Petiot, F., 2008. Chikungunya in Europe. The Lancet 371, 723–724.

Rabitsch, W., 2008. The Times They Are A-Changin': Driving forces of recent additions to the Heteroptera fauna of Austria, in: Grozeva, S., Simov, N. (Eds.), Advances in Heteroptera research: Festschrift in honor of 80th anniversary of Michail Josifov, Faunistica. Pensoft Publishers, Sofia; Moscow, pp. 309–326.

Rabitsch, W., 2010. Insekten-Neozoen in Österreich und Auswirkungen des Klimawandels, in: Rabitsch, W., Essl, F. (Eds.), Aliens: Neobiota und Klimawandel - eine verhängnisvolle Affäre? Verlag Bibliothek der Provinz, Weitra, Österreich, pp. 93–103.

Rabitsch, W., Essl, F., 2009. Endemiten: Kostbarkeiten in Österreichs Pflanzen- und Tierwelt. Naturwissenschaftlicher Verein für Kärnten & Umweltbundesamt, Klagenfurt.

Rabitsch, W., Essl, F. (Eds.), 2010. Aliens: Neobiota und Klimawandel - eine verhängnisvolle Affäre? Bibliothek der Provinz, Weitra.

Rabitsch, W., Winter, M., Kühn, E., Kühn, I., Götzl, M., Essl, F., Gruttke, H., 2010. Auswirkungen des rezenten Klimawandels auf die Fauna in Deutschland., Natschutz und Biologische Vielfalt. Bundesamt für Naturschutz, Bonn-Bad Godesberg.

Rabitsch, W., Milasowszky, N., Nehring, S., Wiesner, C., Wolter, C., Essl, F., 2013. The times are changing: temporal shifts in patterns of fish invasions in central European fresh waters. Journal of Fish Biology 82, 17–33. doi:10.1111/j.1095-8649.2012.03457.x

Randin, C.F., Engler, R., Normand, S., Zappa, M., Zimmermann, N.E., Pearman, P.B., Vittoz, P., Thuiller, W., Guisan, A., 2009. Climate change and plant distribution: local models predict high-elevation persistence. Global Change Biology 15, 1557–1569. doi:10.1111/j.1365-2486.2008.01766.x

Raven, P.H., Evert, R.F., Eichhorn, S.E., 2000. Biologie der Pflanzen, 3. ed. Walter de Gruyter, Berlin, Deutschland, New York, USA.

Reading, C.J., 2007. Linking global warming to amphibian declines through its effects on female body condition and survivorship. Oecologia 151, 125–131. doi:10.1007/s00442-006-0558-1

Rebetez, M., Dobbertin, M., 2004. Climate change may already threaten Scots pine stands in the Swiss Alps. Theoretical and applied climatology 79, 1–9. doi:10.1007/s00704-004-0058-3

Reisenzein, H., Berger, N., Suarez, B., Steffek, R., 2010. Grapevine Flavescence dorée – eine Gefahr für den österreichischen Weinbau? Österreichische Pflanzenschutztage, 1.-2.12.2010, Schloss Seggau/Leibnitz. Leibnitz.

Reusch, T.B., Ehlers, A., Hämmerli, A., Worm, B., 2005. Ecosystem recovery after climatic extremes enhanced by genotypic diversity. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 102, 2826–2831. doi:10.1073/pnas.0500008102

Rigling, A., Dobbertin, M., Gimmi, U., Pannatier, G.E., Gugerli, F., Heininger, U., Polomski, J., Rebetez, M., Rigling, D., Weber, P., Wermelinger, B., Wohlgemuth, T., 2006. Verdrängen Flaumeichen die Walliser Waldföhren? (No. 41), Merkblatt für die Praxis. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, Schweiz.

Rippel, R., 2007. Auswirkungen und Strategien für Landwirtschaft und Umwelt – aus der Sicht des Erosionsschutzes, in: Klimaänderungen und Landwirtschaft – Bestandsaufnahme und Handlungsstrategien für Bayern, Schriftenreihe der Bayrischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL). 13/2007.

Roberts, S., Potts, S., Biesmeijer, K., Kuhlmann, M., Kunin, W., Ohlemüller, R., 2011. Assessing continental-scale risks for generalist and specialist pollinating bee species under climate change. BioRisk - Biodiversity & Ecosystem Risk Assessment 6, 1–18. doi:10.3897/biorisk.6.1325

Robinet, C., Baier, P., Pennerstorfer, J., Schopf, A., Roques, A., 2007. Modelling the effects of climate change on the potential feeding activity of *Thaumetopoea pityocampa* (Den. & Schiff.) (Lep., Notodontidae) in France. Global Ecology and Biogeography 16, 460–471. doi:10.1111/j.1466-8238.2006.00302.x

Rödder, D., Schulte, U., 2010. Amphibien und Reptilien im anthropogenen Klimawandel: Was wissen wir und was erwarten wir? Zeitschrift für Feldherpetologie 17, 1–22.

Root, T.L., Price, J.T., Hall, K.R., Schneider, S.H., Rosenzweig, C., Pounds, J.A., 2003. Fingerprints of global warming on wild animals and plants. Nature 421, 57–60. doi:10.1038/nature01333

Rott, E., Walser, L., Kegele, M., 2000. Ecophysiological aspects of macroalgal seasonality in a gravel stream in the Alps (River Isar, Austria). Internationale Vereinigung fur Theoretische und Angewandte Limnologie Verhandlungen 27, 1622–1625.

Rott, E., Cantonati, M., Füreder, L., Pfister, P., 2006. Benthic Algae in High Altitude Streams of the Alps – a Neglected Component of the Aquatic Biota. Hydrobiologia 562, 195–216. doi:10.1007/s10750-005-1811-z

Rott, E., Gesierich, D., Binder, N., 2010. Lebensraumtypen und Diversitätsgradienten lotischer Algen in einem Gletschereinzugsgebiet, in: Koch, E.-M., Erschbamer, B. (Eds.), Glaziale Und Periglaziale Lebensräume Im Raum Obergurgl, Series / Alpine Forschungsstelle Obergurgl. Innsbruck University Press, Innsbruck.

Rott, E., Hotzy, R., Cantonati, M., Sanders, D., 2012. Calcification types of *Oocardium stratum* Nägeli and microhabitat conditions in springs of the Alps. Freshwater Science 31, 610–624. doi:10.1899/11.084.1

Rouault, G., Candau, J.-N., Lieutier, F., Nageleisen, L.-M., Martin, J.-C., Warzée, N., 2006. Effects of drought and heat on forest insect populations in relation to the 2003 drought in Western Europe. Annals of Forest Science 63, 613–624. doi:10.1051/forest:2006044

Rubel, F., Kottek, M., 2010. Observed and projected climate shifts 1901-2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification. Meteorologische Zeitschrift 19, 135–141. doi:10.1127/0941-2948/2010/0430

Russ, W., 2011. Mehr Wald in Österreich. BFW-Praxisinformation 24.

Salak-Johnson, J.L., McGlone, J.J., 2007. Making sense of apparently conflicting data: Stress and immunity in swine and cattle. Journal of Animal Science 85, E81–E88. doi:10.2527/jas.2006-538

Sauberer, N., 1994. Untersuchungen zur Struktur und Dynamik eines Krummseggenrasens (Caricetum curvulae) in den Ötztaler Alpen. Diplomarbeit. Universität Wien.

Schabhüttl, S., Hingsamer, P., Weigelhofer, G., Hein, T., Weigert, A., Striebel, M., 2013. Temperature and species richness effects in phytoplankton communities. Oecologia 171, 527–536. doi:10.1007/s00442-012-2419-4

Schaller, M., Weigel, H.-J., 2007. Analyse des Sachstands zu Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die deutsche Landwirtschaft und Maßnahmen zur Anpassung (Sonderheft No. 316). Landbauforschung Völkenrode - FAL Agricultural Research, Braunschweig, Deutschland.

Schaumberger, A., 2012. Räumliche Modelle zur Vegetations- und Ertragsdynamik im Wirtschaftsgrünland (Dissertation). Technische Universität Graz, Institut für Geoinformation, Graz.

Schaumberger, J., Buchgraber, K., Schaumberger, A., 2011. Teilbericht 5b: Landwirtschaftliche Flächennutzungspotenziale in Österreich und Simulation von Produktionsszenarien bis 2050. Arbeitspaket 3: Flächennutzungspotenziale und -szenarien (Studie

„Save our Surface“ im Auftrag des Österreichischen Klima- und Energiefonds). LFZ Raumberg-Gumpenstein, Irdning.

Schelhaas, M.-J., Nabuurs, G.-J., Schuck, A., 2003. Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries. Global Change Biology 9, 1620–1633. doi:10.1046/j.1365-2486.2003.00684.x

Scherm, H., 2004. Climate change: can we predict the impacts on plant pathology and pest management? Canadian Journal of Plant Pathology 26, 267–273. doi:10.1080/07060660409507143

Scherrer, D., Koerner, C., 2010. Infra-red thermometry of alpine landscapes challenges climatic warming projections. Global Change Biology 16, 2602–2613. doi:10.1111/j.1365-2486.2009.02122.x

Schindlbacher, A., Zechmeister-Boltenstern, S., Jandl, R., 2009. Carbon losses due to soil warming: Do autotrophic and heterotrophic soil respiration respond equally? Global Change Biology 15, 901-913.

Schindlbacher, A., Rodler, A., Kuffner, M., Kitzler, B., Sessitsch, A., Zechmeister-Boltenstern, S., 2011. Experimental warming effects on the microbial community of a temperate mountain forest soil. Soil biology & biochemistry 43, 1417–1425. doi:10.1016/j.soilbio.2011.03.005

Schindlbacher, A., Wunderlich, S., Borken, W., Kitzler, B., Zechmeister-Boltenstern, S., Jandl, R., 2012. Soil respiration under climate change: Prolonged summer drought offsets soil warming effects. Global Change Biology 18, 2270-2279.

Schleper, C.N., 2010. Ammonia-oxidising archaea-physiology, ecology and evolution, in: Poole, R. (Ed.), Advances in Microbial Physiology. Academic Press, pp. 1–41.

Schmitt, T., 2007. Molecular biogeography of Europe: Pleistocene cycles and postglacial trends. Frontiers in Zoology 4. doi:10.1186/1742-9994-4-11

Schmutz, S., 2008. Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Fischfauna, in: Böhm, R., Godina, R., Nachtnebel, H.P., Pirker, O. (Eds.), Auswirkungen des Klimawandels auf die österreichische Wasserwirtschaft. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft BMLFUW, Wien, pp. 177–186.

Schmutz, S., Mielach, C., 2011. Global warming affecting fish in the Danube River Basin. Danube News 23, 12–14.

Schmutz, S., Matulla, C., Melcher, A., Gerersdorfer, T., Haas, P., Formayer, H., 2004. Beurteilung der Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf die Fischfauna anhand ausgewählter Fließgewässer (Endbericht im Auftrag des Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Abt. V/4, Immissions- und Klimaschutz No. GZ 54 3895/163 V/4/03). Institut für Hydrobiologie und Gewässermanagement (IHG), Institut für Meteorologie (BOKU Met), Wien.

Schmutz, S., Kaufmann, M., Vogel, B., Jungwirth, M., Muhar, S., 2000. A multi-level concept for fish-based, river-type-specific assessment of ecological integrity. Hydrobiologia 422-423, 279–289. doi:10.1023/A:1017038820390

Schopf, A., Blackwell, Wimmer, V., 2012. Untersuchungen zum Einfluss des Klimas auf Voltinismus und Ausbreitung des Buchdruckers, *Ips typographus*, im alpinen Raum (Endbericht Start Clim 2011. A), StartClim2011: Anpassung an den Klimawandel in Österreich– Themenfeld Wald. Universität für Bodenkultur, Institut für Forstentomologie, Forstpathologie und Forstschutz, Wien, Österreich.

Schröck, C., Köckinger, H., Amann, G., Zechmeister, H., 2013. Rote Liste gefährdeter Moose Vorarlbergs, Rote Listen Vorarlbergs, Band 8. inatura, Dornbirn.

Schultz, H.R., Hoppmann, D., Hofmann, M., 2005. Der Einfluss klimatischer Veränderungen auf die phänologische Entwicklung der Rebe, die Sorteneignung sowie Mostgewicht und Säurestruktur der Trauben. (Beitrag zum Integrierteen Klimaschutzprogramm des Landes Hessen (InKlim 2012) des Fachgebiets Weinbau der Forschungsanstalt Geisenheim).

Schultz, S., Vallant, B., Kainz, M.J., 2012. Preferential feeding on high quality diets decreases methyl mercury of farm-raised common carp (*Cyprinus carpio* L.). Aquaculture 338-341, 105–110.

Schumacher, S., Bugmann, H., 2006. The relative importance of climatic effects, wildfires and management for future forest landscape dynamics in the Swiss Alps. Global Change Biology 12, 1435–1450. doi:10.1111/j.1365-2486.2006.01188.x

Schweiger, O., Biesmeijer, J.C., Bommarco, R., Hickler, T., Hulme, P.E., Klotz, S., Kühn, I., Moora, M., Nielsen, A., Ohlemüller, R., Petanidou, T., Potts, S.G., Pyšek, P., Stout, J.C., Sykes, M.T., Tscheulin, T., Vilà, M., Walther, G.-R., Westphal, C., Winter, M., Zobel, M., Settele, J., 2010. Multiple stressors on biotic interactions: how climate change and alien species interact to affect pollination. Biological Reviews 85, 777–795. doi:10.1111/j.1469-185X.2010.00125.x

Schweiger, O., Settele, J., Kudrna, O., Klotz, S., Kühn, I., 2008. Climate change can cause spatial mismatch of trophically interacting species. Ecology 89, 3472–3479. doi:10.1890/07-1748.1

Schweiger, O., Heikkinen, R.K., Harpke, A., Hickler, T., Klotz, S., Kudrna, O., Kühn, I., Pöyry, J., Settele, J., 2011. Increasing range mismatching of interacting species under global change is related to their ecological characteristics. Global Ecology and Biogeography 21, 88–99. doi:10.1111/j.1466-8238.2010.00607.x

Seidl, R., Rammer, W., Jäger, D., Currie, W.S., Lexer, M.J., 2007. Assessing trade-offs between carbon sequestration and timber production within a framework of multi-purpose forestry in Austria. Forest Ecology and Management, Meeting the challenges of process-oriented management. Outcomes of the e-Conference „ForwardFORESTs“. 248, 64–79. doi:10.1016/j.foreco.2007.02.035

Seidl, R., Schelhaas, M.-J., Lindner, M., Lexer, M.J., 2009. Modelling bark beetle disturbances in a large scale forest scenario model to assess climate change impacts and evaluate adaptive management strategies. Reg Environ Change 9, 101–119. doi:10.1007/s10113-008-0068-2

Seidl, R., Rammer, W., Jäger, D., Lexer, M.J., 2008. Impact of bark beetle (*Ips typographus* L.) disturbance on timber production and carbon sequestration in different management strategies under climate change. Forest Ecology and Management 256, 209–220.

Seidl, R., Rammer, W., Lexer, M.J., 2011a. Climate change vulnerability of sustainable forest management in the Eastern Alps. Climatic Change 106, 225–254.

Seidl, R., Schelhaas, M.-J., Lexer, M.J., 2011b. Unraveling the drivers of intensifying forest disturbance regimes in Europe. Global Change Biology 17, 2842–2852. doi:10.1111/j.1365-2486.2011.02452.x

Seidl, R., Thom, D., Krehan, H., Steyrer, G., 2012. Analyzing Austria's forest disturbance regime as basis for the development of climate change adaptation strategies. (Endbericht von StartClim2011.B in Start-Clim2011: Anpassung an den Klimawandel in Österreich: Themenfeld Wald.). Auftraggeber: BMLFUW, BMWF, ÖBF.

Senn-Irlet, B., Egli, S., Boujonm, C., Küchler, H., Küffer, N., Neukom, H.-P., Roth, J.-J., 2012. Pilze schützem und fördern. Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, Schweiz. (No. 49), Merkblatt für die Praxis. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, Schweiz.

Settele, J., Kudrna, O., Harpke, A., Kuehn, I., van Swaay, C., Verovnik, R., Warren, M., Wiemers, M., Hanspach, J., Hickler, T., Kühn, E., van Halder, I., Veling, K., Vliegenthart, A., Wynhoff, I., Schweiger, O., 2008. Climatic Risk Atlas of European Butterflies. BioRisk – Biodiversity and Ecosystem Risk Assessment 1. doi:10.3897/biorisk.1

Shaw, M.W., 2009. Preparing for changes in plant diseases due to climate change. Plant Protection Science 45, 3–10.

Shugart, H.H., 1998. Terrestrial ecosystems in changing environments, Cambridge Studies in Ecology. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Šleger, V., Neuberger, P., 2006. Using meteorological data to determine the risk of heat stress. Res. Agr. Eng. 52, 39–47.

Smith, A.J., 1973. Some effects of high environmental temperatures on the productivity of laying hens (a review). Tropical animal health and production 5, 259–271. doi:10.1007/BF02240427

Smith, P., Andrén, O., Brussaard, L., Dangerfield, M., Ekschmitt, K., Lavelle, P., Tate, K., 1998. Soil biota and global change at the ecosystem level: describing soil biota in mathematical models. Global Change Biology 4, 773–784. doi:10.1046/j.1365-2486.1998.00193.x

Soja, G., Reichenauer, T.G., Eid, M., Soja, A.-M., Schaber, R., Gangl, H., 2004. Long-term ozone exposure and ozone uptake of grapevines in open-top chambers. Atmospheric Environment 38, 2313–2321. doi:10.1016/j.atmosenv.2003.12.038

Soja, G., Eitzinger, J., Schneider, W., Soja, A.M., 2005. Auswirkungen meteorologischer Extreme auf die Pflanzenproduktion in Österreich, in: Kämpf, A., Claupein, W., Graeff, S., Diepenbrock, W. (Eds.), Wasser und Pflanzenbau - Herausforderungen für zukünftige Produktionssysteme, Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften. Presented at the 48. Jahrestagung des Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, Verlag Günter Haimbach, Stuttgart, Wien, pp. 229–230.

Sommaruga, R., Psenner, R., Schafferer, E., Koinig, K.A., Sommaruga-Wograth, S., 1999. Dissolved Organic Carbon Concentration and Phytoplankton Biomass in High-Mountain Lakes of the Austrian Alps: Potential Effect of Climatic Warming on UV Underwater Attenuation. Arctic, Antarctic, and Alpine Research 31. doi:10.2307/1552253

Sommaruga-Wögrath, S., Koinig, K.A., Schmidt, R., Sommaruga, R., Tessadri, R., Psenner, R., 1997. Temperature effects on the acidity of remote alpine lakes. Nature 387, 64–67. doi:10.1038/387064a0

Spiecker, H., 2000. The growth of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) in Europe within and beyond its natural range, in: Hasenauer, H. (Ed.), Forest Ecosystem Restoration. Proceedings of the Conference Held in Vienna, Austria 10.-12. April 2000.

Spiecker, H., 2003. Silvicultural management in maintaining biodiversity and resistance of forests in Europe—temperate zone. Journal of Environmental Management 67, 55–65.

Steffek, R., Reisenzein, H., Zeisner, N., 2006. Risikoanalyse zur Wahrscheinlichkeit der Einschleppung und Etablierung von Flavescence dorée in die österreichischen Weinbaugebiete. Österreichische Pflanzenschutztage, 29.-30.11.2006, Schloss Seggau/Leibnitz. Leibnitz.

Steffek, R., Reisenzein, H., Zeisner, N., 2007. Analysis of the pest risk from Grapevine flavescence dorée phytoplasma to Austrian viticulture. EPPO Bulletin 37, 191–203. doi:10.1111/j.1365-2338.2007.01102.x

Steffek, R., Reisenzein, H., Strauss, G., Leichtfried, T., Hofrichter, J., Kopacka, I., Schwarz, M., Pusterhofer, J., Biedermann, R., Renner, W., Klement, J., Luttenberger, W., Welzl, A., Kleissner, A., Alt, R., 2011. VitisCLIM, a project modelling spread and economic impact of Grapevine Flavescence dorée phytoplasma in Austrian viticulture under a climate change scenario. Bulletin of Insectology (Supplement) 64, 191–192.

Steiner, C., Lexer, M.J., 1998. Ein klimasensitives statisches Modell zur Beurteilung der Baumarteneignung. Forstarchiv 69, 92–103.

Stock, M., Badeck, F., Gerstengarbe, F.W., Hopmann, D., Kartschall, T., Österle, H., Werner, P.C., Wodinski, M., 2005. Perspektiven der Klimaveränderung bis 2050 für den Weinbau in Deutschland (Klima 2050). (PIK-Report No. 106).

Stomp, M., Huisman, J., Mittelbach, G.G., Litchman, E., Klausmeier, C.A., 2011. Large-scale biodiversity patterns in freshwater phytoplankton. Ecology 92, 2096–2107. doi:10.1890/10-1023.1

Strauß, F., Schmid, E., Moltchanova, E., Formayer, H., Wang, X., 2012. Modeling climate change and biophysical impacts of crop production in the Austrian Marchfeld Region. Climatic Change 111, 641–664. doi:10.1007/s10584-011-0171-0

Strauss, G., Steffek, R., Reisenzein, H., Schwarz, M., 2012. Modeling the establishment potential of *Scaphoideus titanus*, vector of Grapevine Flavescence doree phytoplasma, in Europe by using the CLIMEX model., in: NEOBIOTA 2012 Book of Abstracts. 7th European Conference on Invasive Alien Species. Presented at the 7th European Conference on Biological Invasions. Halting Biological Invasions in Europe: from Data to Decisions, GEIB Grupo Especialista en Invasiones Biológicas, Pontevedra, Spain, pp. 105–106.

Sturrock, R., 2012. Climate change and forest diseases: using today's knowledge to address future challenges. Forest Systems 21, 329–336. doi:10.5424/fs/2012212-02230

Sveinbjörnsson, B., Oechel, W.C., 1992. Controls on growth and productivity of bryophytes: environmental limitations under current and anticipated conditions, in: Bates, J.W., Farmer, A.M. (Eds.), Bryophytes and Lichens in a Changing Environment, Oxford Science Publications. Oxford University Press, USA, pp. 77–102.

Sztatecsny, M., 2009. Can protected mountain areas serve as refuges for declining amphibians? Potential threats of climate change and amphibian chytridiomycosis in an alpine amphibian population. Journal on Protected Mountain Areas Research 1, 19–24. doi:10.1553/ecomont2s19

Szukics, U., Abell, G.C.J., Hödl, V., Mitter, B., Sessitsch, A., Hackl, E., Zechmeister-Boltenstern, S., 2010. Nitrifiers and denitrifiers respond rapidly to changed moisture and increasing temperature in a pristine forest soil. FEMS Microbiology Ecology 72, 395–406. doi:10.1111/j.1574-6941.2010.00853.x

Szukics, U., Hackl, E., Zechmeister-Boltenstern, S., Sessitsch, A., 2012. Rapid and dissimilar response of ammonia oxidizing archaea and bacteria to nitrogen and water amendment in two temperate forest soils. Microbiological Research 167, 103–109. doi:10.1016/j.micres.2011.04.002

Taubmann, J., Theissinger, K., Feldheim, K.A., Laube, I., Graf, W., Haase, P., Johannesen, J., Pauls, S.U., 2011. Modelling range shifts and assessing genetic diversity distribution of the montane aquatic mayfly Ameletus inopinatus in Europe under climate change scenarios. Conserv Genet 12, 503–515. doi:10.1007/s10592-010-0157-x

Thaler, S., Eitzinger, J., Trnka, M., Dubrovsky, M., 2012. Impacts of climate change and alternative adaptation options on winter wheat yield and water productivity in a dry climate in Central Europe. The Journal of Agricultural Science 150, 537–555. doi:10.1017/S0021859612000093

Thenmayer, F.J., Schmiedl, J., Glauninger, J., 2006. Die Kraut- und Knollenfäule der Kartoffel (*Phytophthora infestans*) in den Jahren 2000 bis 2006 in Niederösterreich. Österreichische Pflanzenschutztage, 29.-30.11.2006, Schloss Seggau/Leibnitz. Leibnitz.

Theurillat, J.-P., Guisan, A., 2001. Potential impact of climate change on vegetation in the European Alps: a review. Climatic change 50, 77–109. doi:10.1023/A:1010632015572

Thibault, K.M., Brown, J.H., 2008. Impact of an extreme climatic event on community assembly. Proceedings of the National Academy of Sciences 105, 3410–3415.

Thies, H., Nickus, U., Mair, V., Tessadri, R., Tait, D., Thaler, B., Psenner, R., 2007. Unexpected Response of High Alpine Lake Waters to Climate Warming. Environmental Science & Technology 41, 7424–7429. doi:10.1021/es0708060

Thies, H., Tolotti, M., Nickus, U., Lami, A., Musazzi, S., Guilizzoni, P., Rose, N.L., Yang, H., 2012. Interactions of temperature and nutrient changes: effects on phytoplankton in the Piburger See (Tyrol, Austria). Freshwater Biology 57, 2057–2075. doi:10.1111/j.1365-2427.2011.02661.x

Thom, E.C., 1959. The discomfort index. Weatherwise 12, 57–61. doi:10.1080/00431672.1959.9926960

Thuiller, W., Albert, C., Araújo, M.B., Berry, P.M., Cabeza, M., Guisan, A., Hickler, T., Midgley, G.F., Paterson, J., Schurr, F.M., Sykes, M.T., Zimmermann, N.E., 2008. Predicting global change impacts on plant species distributions: Future challenges. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics 9, 137–152. doi:10.1016/j.ppees.2007.09.004

Thuiller, W., Lavergne, S., Roquet, C., Boulangeat, I., Lafourcade, B., Araujo, M.B., 2011. Consequences of climate change on the tree of life in Europe. Nature 470, 531–534. doi:10.1038/nature09705

Tolotti, M., Thies, H., Nickus, U., Psenner, R., 2012. Temperature modulated effects of nutrients on phytoplankton changes in a mountain lake. Hydrobiologia 698, 61–75. doi:10.1007/s10750-012-1146-5

Tomiczek, C., Cech, T.L., Fürst, A., Hoyer-Tomiczek, U., Krehan, H., Perny, B., Steyrer, G., 2011. Waldschutzsituation 2010 in Österreich. Forstschutz Aktuell 52, 3–9.

Tryjanowski, P., Rybacki, M., Sparks, T.H., 2003. Changes in the first spawning dates of common frogs and common toads in western Poland in 1978-2002. Annales Zoologici Fennici 40, 459–464.

Tuba, Z., 2011. Bryophyte physiological processes in a changing climate: an overview, in: Tuba, Z., Slack, N.G., Stark, L.R. (Eds.), Bryophyte Ecology and Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 13–34.

Tuba, Z., Slack, N.G., Stark, L.R. (Eds.), 2011. Bryophyte Ecology And Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Uehlinger, U., 2000. Resistance and resilience of ecosystem metabolism in a flood-prone river system. Freshwater Biology 45, 319–332. doi:10.1111/j.1365-2427.2000.00620.x

Uehlinger, U., Robinson, C.T., Hieber, M., Zah, R., 2011. The physico-chemical habitat template for periphyton in alpine glacial streams under a changing climate. Hydrobiologia 657, 107–121. doi:10.1007/s10750-009-9963-x

Usbeck, T., Wohlgemuth, T., Dobbertin, M., Pfister, C., Bürgi, A., Rebetez, M., 2010. Increasing storm damage to forests in Switzerland from 1858 to 2007. Agricultural and Forest Meteorology 150, 47–55.

Van der Putten, W.H., Macel, M., Visser, M.E., 2010. Predicting species distribution and abundance responses to climate change: why it is essential to include biotic interactions across trophic levels. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences 365, 2025–2034. doi:10.1098/rstb.2010.0037

Van der Schrier, G., Briffa, K.R., Jones, P.D., Osborn, T.J., 2006. Summer moisture variability across Europe. Journal of Climate 19, 2818–2834. doi:http://dx.doi.org/10.1175/JCLI3734.1

Van Dijk, A.A., Huismans, H., 1982. The effect of temperature on the in vitro transcriptase reaction of bluetongue virus, epizootic haemorrhagic disease virus and African horsesickness virus. The Onderstepoort Journal of Veterinary Research 49, 227–232.

Vanderpoorten, A., Goffinet, B., 2009. Introduction to Bryophytes. Cambridge University Press, Cambridge.

Vittoz, P., Bodin, J., Ungricht, S., Burga, C.A., Walther, G.-R., 2008. One century of vegetation change on Isla Persa, a nunatak in the Bernina massif in the Swiss Alps. Journal of Vegetation Science 19, 671–680. doi:10.3170/2008-8-18434

Vittoz, P., Camenisch, M., Mayor, R., Miserere, L., Vust, M., Theurillat, J.-P., 2010. Subalpine-nival gradient of species richness for vascular plants, bryophytes and lichens in the Swiss Inner Alps. Botanica Helvetica 120, 139–149.

Vittoz, P., Cherix, D., Gonseth, Y., Lubini, V., Maggini, R., Zbinden, N., Zumbach, S., 2010. Klimawandel, in: Lachat, T., Pauli, D., Gonseth, Y., Gregor, K., Scheidegger, C., Vittoz, P., Walter, T. (Eds.), Wandel der Biodiversität in der Schweiz seit 1900 ist die Talsohle erreicht?, Zürich, Bristolstiftung. Haupt, Bern, Stuttgart, Wien, pp. 350–377.

Von Haaren, C., Saathoff, W., Bodenschatz, T., Lange, M., 2010. Der Einfluss veränderter Landnutzungen auf Klimawandel und Biodiversität, Naturschutz und Biologische Vielfalt. Bundesamt für Naturschatz. B.N, Landeswirtschaftsverlag.

Von Teuffel, K., Baumgarten, M., Hanewinkel, M., Konold, W., Sauter, U.H., Spiecker, H., Wilpert, K. von, 2005. Waldumbau: für eine zukunftsorientierte Waldwirtschaft. Springer.

Walentowski, H., Lotsch, H., Meier-Uhlherr, R., 2008. Moore und Klimawandel. Viele Moore sitzen bereits heute auf dem Trockenen - steigende Temperaturen sind ihr Hauptfeind. Wald-Wissen-Praxis. LWF-aktuell. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, 15. Jahrgang 67, 44–48.

Walther, G.-R., Beißner, S., Burga, C.A., 2005. Trends in the upward shift of alpine plants. Journal of Vegetation Science 16, 541–548. doi:10.1111/j.1654-1103.2005.tb02394.x

Walther, G.-R., Roques, A., Hulme, P.E., Sykes, M.T., Pyšek, P., Kühn, I., Zobel, M., Bacher, S., Botta-Dukát, Z., Bugmann, H., Czúcz, B., Dauber, J., Hickler, T., Jarošík, V., Kenis, M., Klotz, S., Minchin, D., Moora, M., Nentwig, W., Ott, J., Panov, V.E., Reineking, B., Robinet, C., Semenchenko, V., Solarz, W., Thuiller, W., Vilà, M., Vohland, K., Settele, J., 2009. Alien species in a warmer world: risks and opportunities. Trends in Ecology & Evolution 24, 686–693. doi:10.1016/j.tree.2009.06.008

Weckström, K., Huber, K., Salvenmoser, W., Schaidreiter, V., Psenner, R., Rieradevall, M., Schmidt R., Kurmayer, R., (in prep.). Decadal detection of biodiversity in alpine lakes in relation to climate change.

Wehrli, A., Brang, P., Maier, B., Duc, P., Binder, F., Lingua, E., Ziegner, K., Kleemayr, K., Dorren, L., 2007. Schutzwaldmanagement in den Alpen-eine Übersicht. Management of protection forests in the Alps-an overview. Schweizerische Zeitschrift fur Forstwesen 158, 142–156.

Weigand, S., Tischner, H., 2007. Auswirkungen und Strategien für Landwirtschaft und Umwelt - aus der Sicht des Pflanzenschutzes, in: Klimaänderung und Landwirtschaft - Bestandsaufnahme und

Handlungsstrategien Ffür Bayern. Tagungsband, Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft. Presented at the 6. Kulturlandschaftstag, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Freising-Weihenstephan, pp. 33–46.

Weilguni, V., 2009. Bemessungsniederschläge in Österreich, in: Blöschl, G. (Ed.), Hochwässer - Bemessung, Risikoanalyse und Vorhersage, Wiener Mitteilungen. Wasser, Abwasser, Gewässer. Inst. für Wasserbau und Ingenieurbiologie, TU Wien, Wien, pp. 71–84.

Weinberger, K., 2009. Management von Wetterrisiken in Anbetracht des Klimawandels und der GAP-Reform. Online-Fachzeitschrift des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.

Weiss, P., Schieler, K., Schadauer, K., Radunsky, K., Englisch, M., 2000. Die Kohlenstoffbilanz des Österreichischen Waldes und Betrachtungen zum Kyoto-Protokol, Monographien. Umweltbundesamt, Wien.

Weissenbock, H., Kolodziejek, J., Url, A., Lussy, H., Rebel-Bauder, B., Nowotny, N., 2002. Emergence of Usutu virus, an African Mosquito-Borne Flavivirus of the Japanese Encephalitis Virus Group, Central Europe. Emerg Infect Dis 8, 652–656. doi:10.3201/eid0807.020094

Whitton, B.A., Neal, C., 2011. Organic phosphate in UK rivers and its relevance to algal and bryophyte surveys. Annales de Limnologie - International Journal of Limnology 47, 3–10. doi:10.1051/limn/2010102

Wiens, J.A., Stralberg, D., Jongsomjit, D., Howell, C.A., Snyder, M.A., 2009. Niches, models, and climate change: assessing the assumptions and uncertainties. Proceedings of the National Academy of Sciences 106, 19729–19736.

Wiesner, C., Wolter, C., Rabitsch, W., Nehring, S., 2010. Gebietsfremde Fische in Deutschland und Österreich und mögliche Auswirkungen des Klimawandels: Ergebnisse aus dem F+E-Vorhaben FKZ 806 82 330, BfN-Skripten. Bundesamt für Naturschutz, Bonn.

Winder, M., Schindler, D.E., 2004. Climate change uncouples trophic interactions in an aquatic ecosystem. Ecology 85, 2100–2106. doi:10.1890/04-0151

Winder, M., Sommer, U., 2012. Phytoplankton response to a changing climate. Hydrobiologia 698, 5–16. doi:10.1007/s10750-012-1149-2

Winkler, H., Scheifinger, H., Pollheimer, J., 2004. Auswirkungen des globalen Klimawandels auf Brut- und Zugphänologie von Vögeln in Österreich. (Endbericht zu einem Expertengutachten für das Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft). Wien.

Wipf, S., Stöckli, V., Herz, K., Rixen, C., 2012. The oldest monitoring site of the Alps revisited: accelerated increase in plant species richness on Piz Linard summit since 1835. Plant Ecology & Diversity 6, 447–455. doi:10.1080/17550874.2013.764943

Wittmann, E.J., Baylis, M., 2000. Climate Change: Effects on Culicoides-Transmitted Viruses and Implications for the UK. The Veterinary Journal 160, 107–117. doi:http://dx.doi.org/10.1053/tvjl.2000.0470

Woese, C.R., Kandler, O., Wheelis, M.L., 1990. Towards a natural system of organisms: proposal for the domains Archaea, Bacteria, and Eucarya. Proceedings of the National Academy of Sciences 87, 4576–4579. doi:10.1073/pnas.87.12.4576

Wohlfahrt, G., Mayr, S., 2012. Auswirkungen von Bodentrockenheit auf die Transpiration österreichischer Baumarten (Endbericht von StartClim2011.C in StartClim2011: Anpassung an den Klimawandel – Themenfeld Wald). Auftraggeber: BMLFUW, BMWF, ÖBF.

Wolfram, G., Mikschi, E., 2007. Rote Liste der Fische (Pisces) Österreichs, in: Zulka, K.P. (Ed.), Rote Listen Gefährdeter Tiere Österreichs: Kriechtiere, Lurche, Fische, Nachtfalter, Weichtiere, Grüne Reihe Des BMLFUW. Böhlau Verlag Wien, pp. 61–198.

Woods, A., Coates, K.A., Hamann, A., 2005. Is an Unprecedented Dothistroma Needle Blight Epidemic Related to Climate Change? BioScience 55, 761–769. doi:10.1641/0006-3568(2005)055[0761:IAUDNB]2.0.CO;2

Zarzer, K., 2004. Szenarien für die Grünlandwirtschaft und den Futterbau nach Trockenjahren, in: Toifl, C. (Ed.), Klimawandel: Auswirkungen auf Umwelt und Agrarproduktion. Presented at the ALVA Jahrestagung, Österr. Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit, pp. 162–165.

Zechmeister, H.., Schmitzberger, I., Steurer, B., Peterseil, J., Wrbka, T., 2003. The influence of land-use practices and economics on plant species richness in meadows. Biological Conservation 114, 165–177. doi:10.1016/S0006-3207(03)00020-X

Zechmeister, H.G., Dirnböck, T., Hülber, K., Mirtl, M., 2007a. Assessing airborne pollution effects on bryophytes–lessons learned through long-term integrated monitoring in Austria. Environmental Pollution 147, 696–705. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2006.09.008

Zechmeister, H.G., Moser, D., Milasowszky, N., 2007b. Spatial distribution patterns of *Rhynchostegium megapolitanum* at the landscape scale-an expanding species? Applied Vegetation Science 10, 111–120. doi:10.1111/j.1654-109X.2007.tb00509.x

Zechmeister, H.., Hagel, H., Gendo, A., Osvaldik, V., Schröck, C., Prinz, M., Köckinger, H., 2013. Rote Liste der Moose Niederösterreichs. Wissenschaftliche Mitteilungen aus dem Niederösterreichischen Landesmuseum. in Druck. 24, 7–26.

Zeisner, N., Hausdorf, H., 2006. Die Amerikanische Rebzikade (*Scaphoideus titanus*) in Österreich – Ergebnisse vom Monitoring 2005. Österreichische Pflanzenschutztage, 29.-30.11.2006, Schloss Seggau/Leibnitz. Leibnitz.

Zeisner, N., Hausdorf, H., 2010. Die Gefährdung des österreichischen Weinbaues durch die Amerikanische Rebzikade (*Scaphoideus titanus*).Österreichische Pflanzenschutztage, 1.-2.12.2010, Schloss Seggau/Leibnitz. Leibnitz.

Zierl, B., Bugmann, H., 2007. Sensitivity of carbon cycling in the European Alps to changes of climate and land cover. Climatic Change 85, 195–212. doi:10.1007/s10584-006-9201-8

Zimmermann, N.E., Jandl, R., Hanewinkel, M., Kunstler, G., Klling, C., Gasparini, P., Breznikar, A., S., E., Normand, S., Ulmer, U., Gschwandtner, T., Veit, H., Naumann, M., Falk, W., Mellert, K., Rizzo, M., Skudnik, M., Psomas, A., 2013. Potential Future Ranges of Tree Species in the Alps, in: Management Strategies to Adapt Alpine Space Forests to Climate Change Risks. InTech.

Band 2 Kapitel 4: Der Einfluss des Klimawandels auf die Reliefsphäre
Volume 2 Chapter 4: Climate Change Impact on Geospheres

Koordinierender Leitautor
Thomas Glade

LeitautorInnen
Rainer Bell, Paul Dobesberger, Christine Embleton-Hamann, Reinhard Fromm, Sven Fuchs, Karl Hagen, Johannes Hübl, Gerhard Lieb, Jan-Christoph Otto, Frank Perzl, Robert Peticzka, Christoph Prager, Cyrus Samimi, Oliver Sass, Wolfgang Schöner, Dagmar Schröter, Lothar Schrott, Christian Zangerl, Antonia Zeidler

Für den Begutachtungsprozess
Peter Houben

Inhalt

ZUSAMMENFASSUNG

Der Einfluss des Klimawandels auf die Reliefsphäre ist über veränderte Aktivitäten der unterschiedlichen Oberflächenprozesse sichtbar. Es werden direkte Folgen wie beispielsweise verstärkte Murtätigkeit durch veränderte Niederschlagsverhältnisse und indirekte Folgen wie veränderte Waldbrandaktivität festgestellt. Wesentliche Fragen sind hierbei, welche langfristigen, über viele hunderte und tausende Jahre ablaufenden Schwankungen stattfinden, wie stark der Mensch durch seine raumwirksame Aktivität in das Prozesssystem eingreift und welche Bedeutung der Klimawandel hierin hat. Es muss mit Sorgfalt untersucht werden, ob die festzustellenden Änderungen ausschließlich auf den Einfluss des Klimawandels zurückzuführen sind. Im Rahmen dessen muss in diesem Kontext auch immer die Grundfrage geklärt werden, wie stark der Einfluss des Klimawandels auf die Reliefsphäre, im Vergleich zu den menschlichen Eingriffen, tatsächlich ist. In diesem Kapitel werden die unterschiedlichen Einflüsse auf die Reliefsysteme für gravitative Massenbewegungen, Schneelawinen, periglaziale und glaziale Prozesse, Waldbrände und weitere fluviale und äolische Sedimenttransporte analysiert. Die jeweiligen theoretischen Erläuterungen werden anhand vieler regionaler Beispiele aus Österreich dargestellt. Weiterhin werden die Dienstleistungen der Reliefsphärensysteme mit ihren Supporting -, Provisioning -, Regulating - und Cultural Services vorgestellt. Das Fazit ist, dass der Einfluss des Klimawandels sicherlich großen Einfluss auf die Reliefsphäre besitzt. Eindeutige Signale beschränken sich jedoch auf die Auswirkungen der Extremwetterereignisse und sind mit langfristig stattfindenden Änderungen und dem Einfluss des menschlichen Wirkens auf die Erdoberflächen überlagert. Es wird gezeigt, dass die unterschiedlichen Kräfte in verschiedenen raum-zeitlichen Skalen in den Reliefsphären gleichzeitig agieren. Deshalb können die beobachtbaren Änderungen dieser Reliefsphären nicht immer eindeutig dem Klimawandel zugeordnet werden.

SUMMARY

The climate change impact on geospheres is visible for a variety of earth surface systems. Direct consequences include, for example, increased debris flow activity that is caused by changing extreme precipitation events, while indirect consequences refer to changing forest fire activities. Fundamental issues thus include the simultaneous interaction of long-term trends and patterns over thousands of years with the current human impact on these earth surface systems and the impact of climate change. Consequently, one has to address the investigation of climate change impacts on geospheres with great care in order to avoid any false interpretations of current observed changes. Basically, any determined changes need to be analyzed within their respective contexts in order to identify in detail the role of climate change on earth system processes. In this chapter, the climate change impacts are explored for different earth surface systems such as landslides, snow avalanches, periglacial and glacial processes, forest fires and extended fluvial and aeolian processes. These processes are discussed in this respect using numerous Austrian examples. Finally, the ecosystem services of geospheres are highlighted for supporting -, provisioning -, regulating - and cultural services. It is concluded that climate change impacts have indeed a high influence on geospheres, however, the explicit impact signals have to be reduced to extreme weather events which occur in phases of natural long-term variations and the distinct human impacts on the earth's surfaces. Therefore, the different forces acting within the geospheres at different spatiotemporal scales are overlaid and the consequences of climate change on the earth surface system cannot be unambiguously concluded.

KERNAUSSAGEN

- Reliefsysteme sind von lang-, mittel- und kurzfristigen Änderungen gesteuert.

Viele Untersuchungen zeigen, dass das Relief unserer Erde von sehr langfristigen über Jahrmillionen ablaufende Prozesse wie Gebirgsbildungen, von mittelfristigen über Jahrtausende andauernde Modifikationen wie der Vegetationsveränderung und von kurzfristigen in Perioden von Monaten, Wochen und Tagen stattfindenden Prozessen wie Starkniederschlägen gesteuert wird. Der substanzielle Einfluss des Klimawandels auf die lang- und mittelfristigen Wechselwirkungen in den Reliefsystemen gilt als unwahrscheinlich bei niedriger Beweislage und niedriger Übereinstimmung der Forschungsergebnisse. Der Einfluss auf kurzfristige Veränderungen ist dagegen bei einer mittleren Übereinstimmung und Beweislage als sehr wahrscheinlich anzusehen.

- Der menschliche Einfluss und die Auswirkungen des Klimawandels auf die Reliefsphäre sind häufig nicht zu trennen.

Durch das räumliche und zeitliche Wirken des Menschen in seiner Umwelt werden die Abläufe und Wechselwirkungen im Reliefsystem ganz entscheidend verändert und beeinflusst. Dadurch kann nicht mehr genau zwischen Ursache und Wirkung differenziert werden kann. Ist der Einfluss des Klimawandels

zum Beispiel die Zunahme einer Muraktivität im Gerinne tatsächlich eindeutig auf eine Zunahme von Starkniederschlägen oder aber auf veränderte Geschiebeverfügbarkeit bzw. Landnutzung im Einzugsgebiet zurückzuführen? Eine klare Zuweisung des menschlichen oder des klimatischen Einflusses auf die Reliefsysteme ergibt eine niedrige Übereinstimmung und schwache Beweislage, eine eindeutig beschreibbare Auswirkung des Klimawandels auf die Reliefsphäre wird daher als sehr unwahrscheinlich angesehen.

- Der Einfluss des Klimawandels auf gravitative Massenbewegungen ist sichtbar.

Die maßgebliche Beeinflussung gravitativer Massenbewegungen und Muren durch den Klimawandel wird als wahrscheinlich angesehen, jedoch reagieren die unterschiedlichen Typen von Bewegungen in unterschiedlicher Weise (mittlere Übereinstimmung, geringe Beweislage). Hierzu gehört ein vermehrtes Auftreten spontaner Rutschungen oder Muren durch intensivere Starkniederschläge, aber auch eine verringerte Aktivität bei langsam kriechenden Massenbewegungen durch längere Trockenperioden und verringerte Wasserzufuhr durch Schneeschmelze. Sehr wahrscheinlich ist die Steigerung der Felssturzhäufigkeit oberhalb der Permafrostgrenze (hohe Übereinstimmung, mittlere Beweislage).

- Einflüsse des Klimawandels auf Schneelawinen sind in tieferen Lagen erkennbar.

Veränderte Klimaverhältnisse beeinflussen die winterliche Schneedecke und damit die Schneelawinenaktivität in starker Abhängigkeit mit der Höhenlage. Einen großen Einfluss hat hierbei die steigende Temperatur. Einerseits führt dies in tieferen Lagen zu einer Abnahme der Schneedeckendauer (hohe Übereinstimmung und Beweislage) und andererseits ist zu erwarten, dass mehr Regen – aufgrund der Erwärmung – die Stabilität der Schneedecke negativ beeinflusst (hohe Übereinstimmung, mittlere Beweislage). Die Nassschneelawinen nehmen in tieferen Lagen zu (hohe Übereinstimmung und Beweislage). Bei einer Zunahme extremer Niederschlagereignisse in Hochlagen ist eine Zunahme von Lawinen in höheren Lagen zu erwarten (hohe Übereinstimmung, geringe Beweislage). Faktoren wie der anthropogen bestimmte Waldbestand sind für das Auftreten von Schneelawinen weiterhin wichtig (hohe Übereinstimmung, mittlere Beweislage).

- Das glaziale und periglaziale Reliefsystem wird deutlich vom Klimawandel geprägt.

Da das glaziale und periglaziale Reliefsystem sehr stark über klimatische Signale wie Niederschlag und Temperatur gesteuert wird, kann eine deutliche Auswirkung des Klimawandels konstatiert werden. Als Folge der Gletscherschmelze und des Auftauens von Permafrostbereichen ist mit vermehrten gravitativen Massenbewegungen (besonders Stürze aus Felsbereichen) zu rechnen (hohe Übereinstimmung, mittlerer Beweislage). Ein Rückgang der Permafrostvorkommen in Lockersedimenten (Schutthalden und Blockgletschern) kann zudem eine erhöhte Murgangaktivität zur Folge haben (hohe Übereinstimmung, geringe Beweislage). Eine erhöhte Geschiebetätigkeit in den glazial geprägten Abflussregimen und ein verstärkter Transport von Feinsedimenten der Gletscherschmelze ist mit dem Abschmelzen von Gletschern zu erwarten (hohe Übereinstimmung, geringe Beweislage). Weitere klimabedingte Veränderungen im glazialen und periglazialen Reliefsystem sind daher als sehr wahrscheinlich anzusehen.

- Der Klimawandel verändert das Reliefsystem durch Waldbrände.

Waldbrände werden maßgeblich durch Temperatur und Niederschlag gesteuert. In wärmeren, trockeneren Sommern ist wahrscheinlich mit einer höheren Feuergefahr zu rechnen (hohe Übereinstimmung, mittlere Beweislage). Jedoch ist die Auslösung der Brände zu ca. 90 % anthropogenen Gründen zuzuordnen. Weiterhin wirkt eine verbesserte Brandbekämpfung einem Anstieg der Feuerhäufigkeit entgegen. Beachtung finden muss die veränderte Schutzfunktion von Wald gegenüber anderen Naturgefahren wie Überschwemmungen, Schneelawinen, Muren und Felsstürzen. Zusammengefasst wird der Einfluss des Klimawandels über Waldbrände auf das Reliefsystem bei einer mittleren Übereinstimmung und schwachen Beweislage nur als sehr unwahrscheinlich angesehen.

- Sedimenttransporte werden durch den Klimawandel verändert.

Die Reliefsysteme werden u. a. durch fluviale und äolische Sedimenttransporte geformt und bestimmt. Diese Prozesse sind von den Transportmedien Wasser und Wind abhängig und insofern auch indirekt mitbestimmt durch den Klimawandel. Gleichzeitig modifiziert der Mensch die entsprechenden Systeme beispielsweise über Sedimentrückhaltebecken, Flussregulierungen und Landnutzungen und greift somit in die vom Klimawandel hervorgerufenen Änderungen maßgeblich ein. Die differenzierte Ursachen – Folgenforschung ergibt bei fluvialen Prozessen einen wahrscheinlichen Einfluss des Klimawandels (hohe Übereinstimmung, mittlere Beweislage). Bei äolischen Prozessen wird ein Einfluss des Klimawandels als sehr unwahrscheinlich bewertet (mittlere Übereinstimmung, schwache Beweislage).

- Der Klimawandel beeinflusst die Dienstleistungen der Reliefsphären nur untergeordnet.

Die Dienstleistungen der Reliefsphären sind nur untergeordnet vom Klimawandel beeinflusst. Dieser verändert zwar die unterschiedlichen Services, diese Veränderungen sind jedoch nachrangig zu betrachten gegenüber den anthropogen verursachten Umgestaltungen. Zentrale Bedeutung hat die Reliefsphäre als Cultural Service für den Tourismus und hier besonders den Skitourismus. Dieser Service wird vom Klimawandel beeinflusst. Abgesehen vom Skitourismus fehlen jedoch hier grundlegende Forschungsarbeiten, weshalb bei niedriger Übereinstimmung und schwacher Beweislage ein Einfluss als sehr unwahrscheinlich eingestuft wird.

4.1 Allgemeine Grundlagen
4.1 Fundamentals

4.1.1 Prozesse in Reliefsystemen

Das Relief, definiert als die Oberflächengestalt der Erdoberfläche, ist das Ergebnis endogen und exogen wirksamer Prozesse, wobei im Allgemeinen endogene Prozesse relieferhöhend wirken und exogene Prozesse reliefserniedrigend. Abweichungen wie Grabenbrüche oder Sedimentationen als Ergebnis einer Erosion sind lokal anzutreffen. Grundlegend bleibt festzuhalten, dass die durch Tektonik etc. bedingte potentielle Energie in kinetische Energie umgewandelt wird und zum Prozessablauf führt. Trotzdem hat der Klimawandel für die exogenen Prozesse besondere Bedeutung, da diese geomorphologischen Prozesssysteme ihre Energiezufuhr direkt oder indirekt von der Sonnenstrahlung erhalten und darüber hinaus von Temperatur und Niederschlag gesteuert werden.

Die Reliefsphäre umfasst alle an der Erdoberfläche ablaufenden Prozesse und Formen und wird durch die geomorphologische Prozessdynamik geprägt. Diese Prozesse formten früher, bestimmen heute und werden auch in der Zukunft die Reliefsphäre prägen. In Österreich passiert dies vielgestaltig und umfasst sowohl die Alpen als auch deren Vorländer, die Beckenlandschaften sowie das Gneis- und Granithochland der Böhmischen Masse. Diese heterogene Reliefsphäre weist sehr unterschiedliche geomorphologische Prozesse auf. Zu nennen wären: gravitative Massenbewegungen (Rutschungen, Muren, Stürze), Schneelawinen, periglaziale, glaziale, fluviale und äolische Prozesse. Ganz allgemein ist bei allen Prozessen festzustellen, dass es Bereiche gibt, in denen Material abgetragen (Erosion), transportiert (je nach Prozess und Größe des Ereignisses unterschiedlich weit; von wenigen Metern bis mehrere Kilometer) und abschließend wieder abgelagert (Akkumulation) wird. Neben diesen spielen, wenn auch lokal sehr begrenzt, Waldbrände eine wichtige Rolle, da sie das Prozessgeschehen in diesen Reliefsystemen stark beeinflussen können (Abschnitt 4.2.4).

Gravitative Massenbewegungen sind bruchlose und bruchhafte hangabwärts gerichtete Verlagerungen von Fels- und / oder Lockergesteinen unter Wirkung der Schwerkraft (Dikau und Glade, 2002). Auf folgende Typen von gravitativen Massenbewegungen wird in Abschnitt 4.2.1 eingegangen: Gleitprozesse (flachgründige und tiefgründige Rutschungen), Fließprozesse (Muren) und Sturzprozesse (Steinschlag, Felssturz und Bergsturz). Schneelawinen sind schnelle Massenbewegungen mit einem Volumen von mehr als 100 m³ und einer Länge von mehr als 50 m[1]. Es kann zwischen Trocken- und Naßschneelawinen (nach Art der Schneezusammensetzung) und Fließ- und Staublawinen (nach Art der Bewegung) unterschieden werden (Hübl et al., 2011b; Abschnitt 4.2.2). Periglaziale Prozesse (Abschnitt 4.2.3) kommen in den höheren Bereichen der Hochgebirge (periglaziale bzw. subnivale Höhenstufe) vor. Zur Ausbildung eines dauergefrorenen Unterbodens (Permafrost) kommt es, wenn die mittlere Temperatur während zwei oder mehr aufeinanderfolgenden Jahren unter 0 °C liegt. Permafrostbedingungen befinden sich in den österreichischen Alpen über 2500 m Seehöhe (Ebohon und Schrott, 2008). Im Sommer kommt es durch die Sonneneinstrahlung zu oberflächlichen Auftauprozessen, die spezifische geomorphologische Prozesse wie Bodenkriechen bzw. Solifluktion in Gang setzen. Ein weiteres wichtiges Phänomen, das in diese Prozessgruppe gehört, sind die Blockgletscher. Dabei handelt es sich um Schuttmassen, die einen großen Anteil Eis enthalten, welcher sich deformieren kann, wodurch der Blockgletscher sich kriechend hangabwärts bewegt. Glaziale Prozesse umfassen sämtliche Phänomene, die durch die Bewegung des Gletschereises und der in, auf und unter dem Eis sowie am Eisrand bewegten glazialen Sedimenten durch Erosion und Akkumulation geschaffen werden. Analog fallen unter fluviale Prozesse all jene Phänomene, die durch das fließende Wasser der Bäche und Flüsse erschaffen werden (Abschnitt 4.2.5). Bei den äolischen Prozessen stehen die Wirkung des Windes und der dadurch geschaffenen Erosions- und Akkumulationsformen im Vordergrund.

Rutschungen und Muren werden häufig durch kurze Starkniederschläge oder langandauernde Niederschläge geringerer Intensität ausgelöst. Jedoch ist auch die Temperatur

[1] www.avalanche.org

entscheidend, so dass bei hohen Temperaturen die Evaporation höher und somit die Vorfeuchte des Bodens / Lockergesteins reduziert ist, wodurch eventuell das System stärkere Niederschläge verkraften kann ohne das ein Prozess ausgelöst wird (Crozier, 2010). Sollte zuvor viel Niederschlag in fester Form gefallen sein, entscheidet die Temperatur und die Strahlung über zusätzliche Wasserfreisetzung aus der Schneedecke, wodurch weniger Niederschlag in flüssiger Form benötigt wird, um Rutschungen und Muren auszulösen (Luino, 2005; Matsuura et al., 2013). Hintergründe zur hier angedeuteten komplexen Dynamik geomorphologischer Prozesse werden in Abschnitt 4.1.2 gegeben. Bei Schneelawinen ist die Neuschneemenge, die Triebschneemenge (durch Wind dem Lawinenhang zugeführter Schnee), die Ausbildung von Schwachschichten im Schneepaket (v. a. die Entstehung von Oberflächenreif in kalten Nächten) sowie Temperaturerhöhungen, die zur Durchfeuchtung der Schneedecke führen, entscheidend (Hübl et al., 2011b). Bei den glazialen Prozessen sind im Alpenraum in allen Gletscher-Monitoring Programmen ausschließlich abschmelzende Gletscher zu beobachten. Dies ist v. a. auf die erhöhte Temperatur, die Einstrahlung und den Grad der Bewölkung zurückzuführen, doch im Detail ist auch das Ausmaß und der Zeitpunkt der winterlichen und ggf. sommerlichen Schneedecke entscheidend, wie schnell ein Gletscher abschmilzt (siehe Band 2, Kapitel 2). Beim Permafrost geht man ebenso von einem Ausschmelzen (Degradation) auf Grund der steigenden Temperaturen aus, doch auch dabei sind z. B. der Zeitpunkt und die Mächtigkeit der Schneedecke bedeutsam. Bei den Waldbränden und äolischen Prozessen wird eine starke Trockenheit benötigt, d.h. hohe Temperaturen und wenig Niederschlag, sowie bei letzteren starker Wind. Der Klimawandel manifestiert sich v. a. über die Veränderung der Temperatur, des Niederschlags, der Einstrahlung und der Verdunstung. Verändern sich diese Parameter, könnten sich auch die geomorphologischen Prozesse ändern. In welchem Ausmaße dies geschehen könnte bzw. welche Kenntnisse derzeit bereits hinsichtlich der genannten geomorphologischen Prozesse vorliegen, wird in den nachfolgenden Kapiteln ausführlich diskutiert werden.

Im Folgenden soll auf einige ausgewählte Beispiele eingegangen werden, um stellvertretend das Ausmaß und die potenziellen Konsequenzen geomorphologischer Prozesse aufzuzeigen, die sich durch den Klimawandel zukünftig häufen oder verschärfen könnten.

In der Steiermark kam es im Juni 2009 neben großen Überschwemmungen zur Auslösung von extrem zahlreichen Rutschungen. Allein im Bezirk Feldbach sind 3 000 Rutschungen aufgetreten. Einige Häuser mussten evakuiert werden. Die Sanierung von 382 Rutschungen im Siedlungsgebiet und auf landwirtschaftlichen Nutzflächen gelegenen Rutschungen kostete 8,9 Mio. € (Hornich und Adelwöhrer, 2010). Zur Gesamtschadenhöhe liegen keine Angaben vor. Auslöser für diese Ereignisse waren Niederschläge von bis zu 200 mm / m^2 innerhalb von drei Tagen. Bereits die Schneeschmelze im Winter 2008 / 2009 verursachte infolge der relativ hohen Schneedecke im Frühjahr 2009 etliche Rutschungen (Hornich und Adelwöhrer, 2010). Die Schneeschmelze mag vorbereitend auch dafür gesorgt haben, dass der Untergrund noch sehr feucht war, so dass im Juni die Auslösung neuer Rutschungen begünstigt wurde. Im Verlaufe des Sommers führten verschiedene Starkniederschläge immer wieder zur Reaktivierung und Neuauslösung von Rutschungen (Hornich und Adelwöhrer, 2010; vgl. auch Band 2, Kapitel 6).

In Winter 1998 / 1999 kam es infolge von außergewöhnlich lang andauernden Schneefällen vielerorts zu extremen Schneehöhen in den Alpen, so dass zahlreiche und teilweise extrem große Schneelawinen ausgelöst wurden, so auch in Galtür (Stötter et al., 2002). Im Februar 1999 führten die Schneelawinen dort zu 53 verschütteten Personen, 31 Toten, sechs zerstörten Wohngebäuden und 18 zum Teil schwer beschädigten Gebäuden. Der Sachschaden betrug 5,27 Mio. € (Heumader, 2000). Die beschlossenen Schutzmaßnahmen, deren Umsetzung bis 2020 abgeschlossen sein sollen, belaufen sich auf Kosten in Höhe von ca. 14,5 Mio. € (Stötter et al., 2002). Die Rolle des Klimawandels bei dieser Katastrophe konnte nicht eindeutig geklärt werden (vgl. auch Band 2, Kapitel 6).

Im Jahr 2003 mit dem sehr warmen Sommer wurden in Österreich 203 Waldbrände verursacht. Die meisten davon traten in Niederösterreich, Tirol und Kärnten auf (Vacik, 2012). Häufig waren die Wälder im Hochgebirge betroffen (Gossow et al., 2009). Auch wenn diese überwiegend direkt oder indirekt vom Menschen ausgelöst wurden (Vacik, 2012) und es insgesamt relativ wenige Waldbrände in der Vergangenheit gab, zeigt das Beispiel von 2003, dass bei zunehmenden Temperaturen und Trockenheit auch die Waldbrandgefahr signifikant zunehmen kann. Im gleichen Jahr kam es alpenweit zu einer Zunahme von Sturzereignissen, die u. a. auf degradierenden Permafrost zurückgeführt werden. In Österreich war dies allerdings nicht zu beobachten (vgl. Abschnitt 4.2.5).

Diese Beispiele zeigen, dass das Auftreten geomorphologischer Prozesse und deren Einwirken auf den Lebens- und Gestaltungsraum des Menschen beträchtliche Risiken, Opfer und Schäden hervorrufen kann (vgl. auch Band 2, Kapitel 6). Daher ist dringend zu untersuchen, zu welchen Veränderungen der Naturgefahren im Sinne modifizierter Prozessfrequenzen bzw. -magnituden und der potentiellen Risiken und tatsächli-

chen Schäden der Klimawandel in Zukunft führen kann, um darauf basierend geeignete Gegenmaßnahmen zu ergreifen. Der Einfluss des Klimawandels auf die Reliefsphäre und der in ihr ablaufenden geomorphologischen Prozesse ist Gegenstand der nachfolgenden Kapitel.

4.1.2 Dynamik in Reliefsystemen

Das österreichische Staatsgebiet kann in Bezug auf das Reliefsystem in Großformen gegliedert werden, für die – auf jeweils unterschiedlichen zeitlichen und räumlichen Skalen – gilt, dass sie nicht als statisch angesehen werden können, obgleich charakteristische Landschaftsformen über einen längeren Zeitraum ohne sichtbare Veränderung existieren. Diese Großformen sind das Ergebnis relativ stabiler Grenzbedingungen für ihre Entstehung, wie etwa konstante klimatische Rahmenbedingungen, Tektonik, oder Bodenbedeckung. Folgende Großeinheiten des Reliefsystems können in Österreich unterschieden werden: die österreichischen Alpen (Nord-, Zentral- und Südalpen), die alpinen Vorländer und Becken (Alpen- und Karpatenvorland, Wiener Becken, südöstliches Alpenvorland) sowie das Gneis- und Granithochland (Böhmische Masse). Die Dynamik in diesen Reliefsystemen findet in unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen statt. In geologischen Zeiträumen (> 10^6 Jahre) betrachtet, können endogen und exogen wirksame Prozesse als kontinuierlich angesehen werden, Zeit ist hier eine unabhängige Variable. Wird der Betrachtungszeitraum allerdings verkürzt (< 10^2 Jahre), treten geomorphologische Prozesse diskontinuierlich bzw. episodisch auf. Zeit kann somit zu einer abhängigen, steuernden Variable werden. So transportieren Gebirgsflüsse kontinuierlich Sediment aus den Einzugsgebieten in die Vorfluter, auf einer kleineren Skale (< 10 Jahre) findet dieser Transport jedoch je nach Ereignisverteilung im Jahresverlauf (Maximum im Frühsommer) und im Tagesverlauf (Maximum am frühen Nachmittag) mit unterschiedlicher Intensität statt. Je nach Argumentation befindet sich somit das Reliefsystem im Ostalpenraum in einem dynamischen Gleichgewicht oder ist das Ergebnis nichtlinearer Dynamik und komplexer Wechselwirkungen (Keiler et al., 2010).

Der Grundgedanke einer Messung der Effektivität von Veränderungen im Reliefsystem beruht auf dem Konzept von Frequenz (Ereignishäufigkeit) und Magnitude (Ereignisgröße). Häufige Ereignisse treten hierbei mit kleineren Magnituden auf als seltene Ereignisse, die umgekehrt eine höhere Ereignismagnitude aufweisen.

Da die meisten Veränderungen im Reliefsystem (auf einer kleinen zeitlichen Skale) aus diskontinuierlichen Prozessereignissen bestehen, sagt ein Mittelwert der Veränderung in Reliefsystemen jedoch wenig aus. Die Frequenz eines Ereignisses ergibt sich aus der Häufigkeit, mit der eine Ereignisgröße innerhalb eines bestimmten Zeitraums überschritten wird und drückt sich im Allgemeinen über die Eintretenswahrscheinlichkeit des Ereignisses aus. Viele geomorphologische Prozesse entziehen sich hinsichtlich der Frequenz und Magnitude jedoch einer direkten Messung, da sie entweder nicht beobachtet werden oder sie in langen Zeiträumen und großen Gebieten stattfinden, die bisher messtechnisch nur sehr schwer zu erfassen sind. Folglich muss der Zusammenhang zwischen Ereignisgröße und zeitlichem Auftreten indirekt abgeleitet werden. Dies erfordert eine Kenntnis der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge, wobei zwischen Grunddisposition, variabler Disposition und auslösendem Ereignis unterschieden wird. Der Begriff Disposition bezeichnet den Systemzustand über die Zeit und steuert die Anfälligkeit eines betrachteten Gebietes gegenüber Veränderungen im Reliefsystem. Die Grunddisposition ist über den gewählten Betrachtungszeitraum mehr oder weniger konstant und räumlich beispielsweise durch die geologischen Verhältnisse geprägt. Variable Disposition bezeichnet die mittelfristige zeitliche Variabilität von Faktoren, die Veränderungen im Reliefsystem zur Folge haben, wie beispielsweise die hydrologischen Bedingungen im Untersuchungsgebiet. Auslösende Ereignisse (Trigger) sind episodische und im Normalfall auf einer kleinen zeitlichen und räumlichen Skale wirksame Belastungen des Systems, die unmittelbar zu einer Veränderung der Oberflächenform führen (Zimmermann, 2013).

Auslösende Ereignisse sind mit dem Begriff des Schwellenwertes verbunden. Allgemein kann ein Schwellenwert definiert werden als kritische Konstellation, bei deren Eintreten sich abrupte Änderungen im Prozessverhalten des Systems ergeben. Diese Änderungen können Ergebnis eines internen Faktors aufgrund progressiver interner Systemänderungen (Beispiel: Zunahme der Abflussgeschwindigkeit führt zum Transport größerer Korngrößen) oder eines externen Faktors sein (Beispiel: hohe Niederschlagsintensitäten führen zu einer Überschreitung des Scherwiderstandes, es werden Rutschungen ausgelöst). In hoch sensitiven Reliefsystemen führen relativ kleine Änderungen bei den prozessauslösenden Faktoren zu Änderungen im System, während wenig sensitive Systeme nicht zu einer Systemänderung neigen. Derartige nichtlineare Beziehungen zwischen Frequenz, Magnitude, und Schwellenwerten stellen eine Herausforderung für die Quantifizierung der Dynamik in Reliefsystemen dar.

Während Untersuchungen zu den direkten Auswirkungen des Klimawandels – vor allem in Bezug auf die Kryosphäre – im Ostalpenraum lange Forschungstradition haben (z. B.

Abermann et al., 2009; vgl. Abschnitt 4.2.3 und 4.2.5), weist die Untersuchung indirekter Auswirkungen auf das Reliefsystem hingegen noch Forschungsbedarf auf (Keiler et al., 2010). Es wird postuliert, dass vor allem bei jenen Prozessgruppen, an denen Wasser als Agens beteiligt ist, eine Aktivitätszunahme zu beobachten ist (Fuchs, 2010). Die Analyse alpiner Naturgefahrenprozesse in Österreich zeigt aber auch, dass die Anzahl schadensverursachender Ereignisse seit 1950 rückläufig ist (Fuchs, 2009; Totschnig et al., 2011) und ein Trend hin zu einer höheren Frequenz oder einer größeren Magnitude derzeit nicht nachweisbar ist. Ursachen hierfür sind zum einen in der Erstellung technischer Verbauungen im gesamten hydrologischen Einzugsgebiet zu suchen, zum anderen in einer Veränderung der Vegetationsgrenze im Alpenraum und der Artenzusammensetzung, die wiederum mit Klimaänderungen zusammenhängen, aber auch mit einer geänderten Struktur der Landnutzung in Höhenlagen. Dies wird aus geomorphologischer Sicht und für eine andere zeitliche Skale auch von Embleton-Hamann und Slaymaker (2012) diskutiert. Die für die Geomorphologie wichtigen Ablagerungs- und Umlagerungsraten von Sediment waren im frühen Postglazial deutlich höher als heute. Darüber hinaus gibt es Hinweise, dass geomorphologische Verlagerungs- und Umlagerungsprozesse in Gebirgsregionen vor allem die Höhenlagen < 2 200 m Seehöhe sedimentlimitiert sind (Harris et al., 2009). Bislang ist dies jedoch für den österreichischen Alpenraum nicht hinreichend genau quantifiziert worden. Ebenso konnte beispielsweise nicht einwandfrei nachgewiesen werden, dass der Rückgang des Permafrosts eine Zunahme von Hanginstabilitäten oder generell eine erhöhte Aktivität geomorphologischer Prozesse zur Folge hat (Sattler et al., 2011). Allerdings scheinen sich die Anrissbereiche von Gerinneprozessen sukzessive in größere Höhenlagen zu verschieben (Bader und Kunz, 2000).

Änderungen im Temperaturregime und in der jahreszeitlichen Verteilung des Niederschlages haben eine Reihe von Sekundäreffekten zur Folge (Gletscherausdehnung, Verteilung und jahreszeitliche Dauer der Schneedecke, Permafrostverteilung). Änderungen im Reliefsystem sind stark von Hangneigung und -exposition abhängig, der Sedimentverfügbarkeit und dem Bodenwasserhaushalt. Die hohe räumliche und zeitliche Variabilität dieser Parameter macht exakte Aussagen zur Dynamik in Reliefsystemen schwierig (Huggel et al., 2012a; Keiler et al., 2012). Während es ein grundsätzliches theoretisches Verständnis für die diskutierte Aktivitätsänderung von Massenverlagerungsprozessen gibt, können Veränderungen hinsichtlich der Magnitude und Frequenz aus den bisherigen Archiven weder für den österreichischen Alpenraum, noch für einzelne Einzugsgebiete hinreichend genau abgeleitet werden. Es gibt Hinweise darauf, dass systeminterne Rückkoppelungsmechanismen einen stärkeren Einfluss auf die Dynamik in Reliefsystemen haben, als die derzeitige Rate der Änderung klimatologischer Parameter (Sailer et al., 2012). Andererseits wird argumentiert, dass der Klimawandel nur eine Ursache für die Dynamik in Reliefsystemen darstellt, diese Dynamik ist insbesondere im Alpenraum aber des Weiteren von einem langfristig wirkenden Signal gesteuert: der Anpassung der Landschaftsdynamik nach dem Ende der letzten Eiszeit. Dieser langfristige Übergang von einem vergletscherten Stadium zu einem unvergletscherten führt mit einer zeitlichen Verzögerung zu einer gewissen Dynamik im Prozessgeschehen nicht nur im österreichischen Alpenraum, sondern ebenso in den Vorländern und Becken.

Aus diesem Grund kommt der weiteren Untersuchung dieser Phänomene eine hohe Bedeutung zu, vor allem in einem dicht besiedelten und von unterschiedlichen Nutzungsansprüchen geprägten Raum wie den Ostalpen.

4.1.3 Menschlicher Einfluss auf die Reliefsysteme

Die Reliefsphäre setzt sich aus unterschiedlichsten Komponenten der Klima-, Vegetations-, Hydro-, Pedo- und Lithosphäre zusammen. Wenn man sich den Auswirkungen des Klimas auf die Reliefsphäre widmet muss jedoch unbedingt beachtet werden, dass es bestimmte Gebiete gibt in denen diese Auswirkungen rein „natürlich“ wirken, d.h. die Prozessabläufe in der Reliefsphäre sind vom Menschen direkt relativ unbeeinflusst. Es gibt jedoch auch Regionen, in denen der „Human Impact“ so groß ist, dass die Wirkungen des Klimas grundsätzlich verändert werden können. Dies kann dazu führen, dass ein klimatischer Auslöser durch den „Human Impact“ verstärkt (z. B. durch Kanalisierung) oder reduziert wird (z. B. durch Wasserreservoire, vgl. auch Bender et al., 2011). Natürlich sind diese Wirkungen trotz der möglichen Reduktion oder Verstärkung immer auch Ausdruck der Magnitude und dem Wiederkehrintervall der meteorologischen Auslöser.

Grundsätzlich wirkt der Mensch indirekt auf die gesamte Reliefsphäre. Über den global wirkenden Klimawandel mit seinen regional differenzierten Ausprägungen sind auch Gebiete der Reliefsphäre betroffen, die nicht direkt von der Gesellschaft verändert wurden. Hierzu zählen in Österreich beispielsweise die meisten Gletscher in den Hochgebirgen. Aber bereits die großen Seen in den alpinen Tälern sind vom Menschen beeinflusst, sei es durch kontrollierte Zu- und Ableitungen oder sei es im Kontext der touristischen Nutzung. Aus dem Grund der starken anthropogenen Beeinflussung der Reliefsphäre werden

im Folgenden die unterschiedlichen Möglichkeiten der Modifikationen näher beleuchtet. Hierdurch wird aufgezeigt, dass die später aufgeführten Veränderungen nicht zu leichtfertig den Klimafolgen zugeschrieben werden dürfen.

Besonders tragend für die Reliefsphäre sind die direkten Eingriffe der Gesellschaft im weitesten Sinne (Messerli et al., 2000). Hierzu gehören beispielsweise Vegetationsänderungen (Crozier, 2010), Hangmodifikationen durch Flurbereinigungen oder für neue Siedlungsräume, Verbauungen von Wildbächen, Begradigungen von Flüssen und Änderungen des hydrologischen Kreislaufes (z. B. durch Staudämme, Drainagen, Wasserzu- oder -ableitungen) (z. B. Debene, 2006; Prettenthaler et al. 2010). Im Folgenden sollen diese direkten Wirkungen exemplarisch an den vier Themenkomplexen *Veränderungen*, *Umgestaltung*, *Steuerung* und *Auslösung* aufgegriffen werden, anhand derer die unterschiedliche Ausprägung der Wechselwirkung zwischen dem Klima und der Gesellschaft im weitesten Sinne dargelegt wird.

- Die Gesellschaft *verändert* das natürliche Frequenz- / Magnituden-Verhältnis der in der Reliefsphäre ablaufenden Prozesse wie beispielsweise Muren, Hangrutschungen, Schneelawinen, Überschwemmungen oder Feuer. Dies sei am Beispiel von Wildbachverbauungen verdeutlicht. Die Wildbachverbauungen zielen u. a. auf eine Reduktion der natürlichen Tiefen- und Seitenerosion der Wildbäche. Häufig werden hierzu in regelmäßigen Abständen Murverbauungen in die Wildbäche eingebracht um das Gefälle zu verringern und das Geschiebe zurückzuhalten. Somit wird die Erosionskraft des Wildbaches reduziert. Diese Verbauungen eignen sich ausgezeichnet zur Reduktion des Auftretens von kleinen Muren mit hoher Frequenz. Falls jedoch ein extremes Niederschlagsereignis auftritt das größer als das „Design"ereignis der Verbauung ist besteht die Gefahr, dass die Schutzbauten versagen und kollabieren (Alcoverro et al., 1999). Dadurch steht eine viel größere Geschiebefracht zur Verfügung als unter natürlichen Umständen zum Transport bereit steht, denn die vielen kleineren Murereignisse hätten bereits das Sediment aus den Einzugsgebieten sukzessive abtransportiert. In den verbauten Einzugsgebieten kann somit das Frequenz- / Magnituden-Verhältnis der Muren durch die Designgrößen der Schutzbauwerke determiniert werden. Bei extrem großen und seltenen Ereignissen kann dies sogar noch zu einer Vergrößerung der Prozessmagnitude beitragen, d.h. Klimafolgen können durch ein anthropogenes Signal verstärkt werden.
- Die Gesellschaft *gestaltet* und modifiziert direkt die materielle Umwelt und verändert somit die Prozessabläufe in der Reliefsphäre. Der Bau von Infrastruktur, die Ausweitung von Nutzungsräumen oder die intensive agrarische Nutzung verändert flächenhaft die Prozessabläufe in der Reliefsphäre (z. B. Crozier, 2010). Durch den Bau von touristischer Infrastruktur im hochalpinen Raum (z. B. Bergstationen, Fundamente der Stützpfeiler, etc.) kann sich der Permafrost zurück bilden und es kann lokal begrenzt aber auch großflächig zu starken Felsbewegungen kommen, die ein großes Zerstörungspotential haben (Stoffel und Huggel, 2012). Hangstabilitäten verändern sich aufgrund von künstlichen Böschungen, Aufschüttungen oder Hangoberflächenmodifikationen beispielsweise durch Flurbereinigungen. Dies führt zu einer geänderten Hydrologie entweder des natürlichen Oberflächen-, Zwischen- oder Grundwasserabfluss oder über Drainagen oder Zuleitungen zu komplett veränderten Wasserbewegungen (Djerbal und Melbouci, 2012). Untersuchungen in Gasen / Haslau von Rutschungen haben beispielsweise gezeigt, dass die Lage der gravitativen Massenbewegungen neben den natürlichen Faktoren auch sehr stark auch vom Wegenetz abhängig ist (Länger, 1975; Andrecs et al., 2007). Dies hat einen signifikanten Einfluss auf spätere Gefahrenhinweiskarten, die neben den eigentlichen auslösenden Faktoren wie Starkniederschlägen auch sehr stark über anthropogene Faktoren gesteuert sein können (Zhao et al., 2010).
- Die Gesellschaft *steuert* die Prozesse der Reliefsphäre direkt. Beispiele seien hierfür Flussverbauungen, Vegetationsänderungen, Einbringung von Dünger mit den Folgen einer geochemisch veränderten Bodenstruktur und beeinflussten Hangstabilitäten oder Entnahme von Grundwasser. Auch der Bau von Wasserreservoiren ist hierfür ein ausgezeichnetes Beispiel (Xia et al., 2013). Über diese großen Reservoire wird der Wasserkreislauf kontrolliert. Wasser wird künstlich gespeichert und dem Wasserkreislauf bedarfsgerecht zugeführt. Mögliche Auswirkungen beinhalten u. a. eine geänderte Geschiebeführung der fluvialen Systeme, eine veränderte Grundwasserneubildung, veränderte Hangstabilitäten im Staubereich und veränderte Bodenfeuchteregime mit entsprechenden Folgen in der Vegetationsdecke. Auch hier können folglich Auswirkungen möglicher Klimaänderungen entweder gepuffert oder in ihren Wirkungen verstärkt werden.
- Die Gesellschaft *löst* Prozesse in unserer natürlichen Umwelt aus. Dies können so simple Dinge wie die weggeworfenen Zigarette, die einen Waldbrand auslöst, betreffen.

Die Auslösung reicht aber auch bis zu zur Energiegewinnung genutzten Wasserstauwehren. Beispielsweise besteht bei großer langanhaltender Trockenheit ein hoher Strombedarf. Dies führt an den Strombörsen zu einem hohen Abnahmepreis. Zur Erzielung des bestmöglichen Gewinns werden dann große Mengen von Wasser freigesetzt um in den Laufturbinen die entsprechende Energiemenge zu produzieren. Die entstehenden Schwallwellen stellen nicht nur eine Gefahr für die Menschen dar, die sich im Unterlauf möglicherweise im Flusslauf befinden, sondern löst auch einen Geschiebetransport aus, der unter normalen klimatischen Umständen, wie beispielsweise einem kleinen Niederschlagsereignis im Einzugsgebiet oder eines trockenen Sommertages, nicht stattgefunden hätte (Pfitscher, 1996). Dies betrifft selbstverständlich auch die direkten potenziellen Auswirkungen auf die Gewässerökologie. Im Kontext der plötzlichen Freisetzung großer Mengen von Schwallwasser wird kurz auf den tragischen Fall im Martell-Tal in Südtirol eingegangen. Am 24. August 1987 führte eine Verkettung unglücklicher Umstände (Pfitscher, 1996) zu einer großen Wasserfreisetzung. Diese initiierte einen riesigen Geschiebetransport, der ca. 18 ha landwirtschaftliche Flächen zerstörte und in den Gemeinden Gand, Ennewasser und Latsch Schäden in der Höhen von 23–25 Mio € verursachte. Leider waren in diesem Ereignis auch Tote und viele Verletzte zu beklagen (Pfitscher, 1996). Gerade in diesem Beispiel wird deutlich, dass in der Natur ablaufende Prozesse nicht mehr eindeutig einem Klimasignal zuzuordnen sind.

Auf Basis der vier exemplarischen Themenkomplexen *Veränderungen*, *Umgestaltung*, *Steuerung* und *Auslösung* muss konstatiert werden, dass die Gesellschaft mit all ihrem Wirken durch die unterschiedlichsten Mechanismen in den verschiedensten Skalen (lokale Wassereinleitung bis regionale Abholzung) auch in Österreich einen sehr großen Einfluss auf die Reliefsphäre besitzt. Eine grundlegende Problematik liegt in der Tatsache, dass dieses gesellschaftliche Wirken zeitgleich mit den unbestrittenen Auswirkungen des Klimawandels zusammenfällt. Diese beiden Kräfte wirken häufig zeitversetzt. Beispielsweise wird ein neu entwaldetes oder flurbereinigtes Gebiet erst dann von gravitativen Massenbewegungen betroffen, wenn auch der Auslöser, beispielsweise ein Starkregenereignis, wirkt – auch wenn dies erst nach 10 Jahren stattfindet. Die eineindeutige Differenzierung der beiden Kräfte Klima und Gesellschaft ist eines der wesentlichen zukünftigen Ziele. Nur durch diese Differenzierung des Ursache- / Wirkungsgefüges können die in der Reliefsphäre wirkenden Prozesse getrennt betrachtet werden. Und diese getrennte Betrachtung ist unabdingbar für eine fundierte Bewertung der treibenden Kräfte in der Reliefsphäre, sei es der „Human Impact", sei es der Klimawandel oder sei es die untrennbare Kombination der beiden. In der Erforschung der einzelnen gestaltenden Kräfte liegt ein großer zukünftiger Forschungsbedarf.

4.2 Einflüsse auf Reliefsysteme
4.2 Impact on landform systems

Die klimarelevanten Einflüsse auf die Reliefsysteme sind vielfältig und beinhalten folgende Prozessbereiche: gravitative Massenbewegungen, Schneelawinen, periglaziale Prozesse, Waldbrände und weitere Sedimenttransporte wie fluviale, glaziale und äolische Prozesse. Es sei darauf hingewiesen, dass die Bodenerosion nicht an dieser Stelle sondern in Band 2, Kapitel 5 behandelt wird.

4.2.1 Gravitative Massenbewegungen

Gravitative Massenbewegungen werden vorwiegend durch die Schwerkraft gesteuert. Bei der Auslösung und teils auch hinsichtlich der Prozessdynamik spielen klimatische Bedingungen eine wesentliche Rolle. Die auftretenden Massenbewegungen lassen sich in Sturzprozesse (Steinschlag & Felssturz), tiefgründige Massenbewegungen (Bergstürze), Rutschungen und Muren unterscheiden.

Rutschungen

Rutschungen treten in vielen Regionen Österreichs auf und können sowohl beträchtliche ökonomische Schäden als auch Todesfälle verursachen. Sie werden definiert als hangabwärtsgerichtete Bewegungen von Locker- und / oder Festgestein auf Gleitflächen oder dünnen Zonen intensiver Scherverformung (Dikau und Glade, 2002). Rutschungen werden meist durch kurze intensive oder langanhaltende Niederschläge ausgelöst, oft auch in Kombination mit einer starken Schneeschmelze (Luino, 2005; Matsuura et al., 2013). Darüber hinaus können sie ebenfalls durch Erdbeben oder anthropogen ausgelöst werden. Da der Klimawandel die hydrometeorologischen Faktoren beeinflussen wird, werden nur diese hier näher betrachtet.

Generell können flach- und tiefgründige Rutschungen unterschieden werden. Erstere treten für gewöhnlich spontan auf, während tiefgründige Rutschungen sich auch kontinuierlich bewegen können. Die Magnituden reichen von einigen m^3 bis zu mehreren Millionen m^3, die Geschwindigkeiten von

mm / Jahr bis zu mehreren m / Tag. Es handelt sich demnach um Prozesse, die sich sehr divers manifestieren können. Während kurze Starkniederschläge vor allem flachgründige Rutschungen auslösen, verursachen langanhaltende Niederschläge sowohl flachgründige als auch tiefgründige Rutschungen (z. B. Zêzere et al., 2005; Guzzetti et al., 2007; Marques et al., 2008; Crozier, 2010; Matsuura et al., 2013).

Am rutschungsanfälligsten ist die Flyschzone, die den nördlichen Kalkalpen vorgelagert ist (Schweigl und Hervás, 2009). Während die grobkörnigen Bereiche der Molasse relativ stabil sind, ist die feinkörnige Molasse ebenso wie die Anteile der nördlichen Kalkalpen, in denen Mergel-, Ton-, Salz- oder Gipslagen dazwischen geschaltet sind, sowie Phyllite und Glimmerschiefer der Zentralalpen anfällig für Rutschungsprozesse (vgl. Schweigl und Hervás, 2009). Darüber hinaus treten flachgründige Rutschungen in den quartären Deckschichten und Verwitterungsdecken auf.

In der letzten Dekade hat es einige extreme Ereignisse in Österreich gegeben, wie z. B. 2005 in Vorarlberg, Gasen / Haslau (> 770 gravitative Massenbewegungen inkl. Rutschungen; Tilch et al., 2011) und Tirol (hier sind kaum Rutschungen aufgetreten sondern v. a. Hochwasser und Muren) (BMLFUW, 2006). Im Jahr 2009 gab es Extremereignisse in Niederösterreich (> 300 gemeldete Rutschungen [Schweigl, pers. Mitteilung] sowie > 600 Rutschungen in Klingfurth und Umgebung; vgl. Tilch, 2009) und der Steiermark (> 3 000 Rutschungen; Hornich und Adelwöhrer, 2010). In 2010 war v. a. das Kleinsölktal in der Steiermark betroffen (zahlreiche Rutschungen und Muren, siehe Abbildung 4.1) und 2012 die Obersteiermark, hier v. a. das Paltental und St. Lorenzen. Bei letzterem führten zahlreiche Rutschungen zur Bereitstellung von sehr viel Sediment im Gerinne, woraufhin sich eine sehr große Mure entwickelte, die sehr große Schäden in St. Lorenzen verursachte (Mayerl, 2012, pers. Mitteilung). Demnach scheint es v. a. in der Steiermark eine Häufung der Extremereignisse zu geben. Eine nähere Untersuchung dessen liegt allerdings noch nicht vor.

Theoretisch scheint es sehr plausibel, dass infolge des Klimawandels mit zunehmenden Niederschlägen, insbesondere jener mit höherer Intensität, auch die Rutschungsgefährdung zunimmt, da die Kohäsion reduziert und positiver Porenwasserdruck aufgebaut werden kann, welcher die Hangstabilität reduziert. Über mehrere Dekaden bis Jahrzehnte können langfristig die erhöhten Temperaturen und die vermehrte Feuchtigkeit die Verwitterungsintensität erhöhen und damit über die Zeit ebenfalls die Hangstabilität reduzieren (Crozier, 2010). Crozier (2010) merkt aber kritisch an, dass die Infiltrationskapazität des Bodens darüber entscheidet, wie viel Wasser in den Boden infiltrieren kann, so dass eine erhöhte Niederschlagsintensität gegebenenfalls nur zu erhöhtem Oberflächenabfluss führt. Er verweist auf ein Beispiel, bei dem bei einem Starkniederschlagsereignis mehrheitlich Rutschungen im Wald ausgelöst wurden. Als Erklärung wird die erhöhte Infiltrationskapazität im Wald angeführt, die in diesem Fall offensichtlich bedeutender war als die stabilisierende Wirkung über die Wurzelkohäsion. Generell dominiert die Ansicht,



Abbildung 4.1 Durch ein stationäres Gewitter mit > 130 mm Niederschlag in 3 Stunden ausgelöste Rutschungen und Muren im Kleinsölktal 2010. Foto: Markus Mayerl, Wildbach- und Lawinenverbauung, Gebietsbauleitung Ennstal und Salzatal

Figure 4.1 Landslides and debris flows triggered by a stationary thunderstorm characterized by > 130 mm precipitation in 3 hours in the Kleinsölk-valley 2010. Fotograph: Markus Mayerl, Torrent and Avalanche Control, section Ennsvalley and Salzavalley

dass der Wald eine stabilisierende Wirkung auf die Hänge hat, was empirisch u. a. durch das Ereignis in der Steiermark 2009 belegt wird, bei dem der überwiegende Teil der Rutschungen auf landwirtschaftlichen Flächen aufgetreten ist und nicht im Wald (Hornich und Adelwöhrer, 2010). Rickli et al. (2002) weisen allerdings darauf hin, dass die stabilisierende Wirkung des Waldes abhängig ist von der Hangneigung und somit ab einem bestimmten Schwellenwert diese nicht mehr gegeben ist. Dieser Schwellenwert ist vermutlich auch von den Umweltbedingungen abhängig und kann sich demnach infolge des Klimawandels ändern. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist, dass der Wald zwar die Frequenz kleinerer und meist flachgründiger Rutschungen verringern kann, es aber mittel- und langfristig zu mehr größeren Rutschungen kommt, so dass über die Zeit das Volumen des verlagerten Materials unter Wald genauso groß oder gar größer sein kann als bei anderen Landnutzungen (z. B. Moser, 1980; Rickli, 2002). Im Zuge der Diskussion rund um die Auswirkungen des Klimawandels sind somit noch vielfältige Fragen zum Einfluss des Waldes auf die Hangstabilität zu klären.

Ein wichtiger Aspekt ist, dass mit den steigenden Temperaturen auch die Verdunstung zunimmt. Studien zur Vorhersage von klimatischen Parametern mittels Downscaling von globalen Zirkulationsmodellen der Atmosphäre kommen durchaus zu dem Schluss, dass eine erhöhte Rutschaktivität aufgrund der stärker zunehmenden Evapotranspiration unwahrscheinlich ist (Collison et al., 2000) oder dass gar die Rutschaktivität deutlich zurückgehen wird (van Beek, 2002). In einer anderen Studie zeigen die Modellrechnungen, dass der Niederschlag weniger werden wird, so dass mit einer geringeren Rutschaktivität zu rechnen sei (Dehn et al., 2000). Alle derartigen Forschungsarbeiten sind mit sehr großen Unsicherheiten behaftet. Melchiorre und Frattini (2012) betonen neben den Unsicherheiten in den Niederschlagsszenarien v. a. die großen Unsicherheiten in den Parametern zur Hanghydrologie und Hangstabilität, welche die Unsicherheiten bezüglich der Klimaänderung übertreffen können, so dass sie keine akkuraten quantitativen Aussagen zur Veränderung der Hangstabilität infolge einer Klimaänderung treffen können.

Neben den erwähnten Unsicherheiten stellen aber auch komplexe nichtlineare Verhaltensweisen der betroffenen Geosysteme große Herausforderungen dar (siehe auch Abschnitt 4.1.2), um Aussagen über die vom Klimawandel abhängigen zukünftigen Rutschungsgefährdungen zu treffen. Hier sind u. a. negative und positive Feedback-Mechanismen, Schwellenwerte und „Tipping points“, sowie Selbstorganisation zu nennen (Philipps, 2003 und Huggel et al., 2012a). So kann z. B. ein positiver Feedback-Mechanismus dazu führen, dass ein ursprünglicher Impuls durch eine klimatische Veränderung Prozesse in Gang setzt, die sich nachfolgend allerdings unabhängig von einer Klimaänderung entwickeln; das Überschreiten von Schwellenwerten und das Vorhandensein von Tipping points kann dazu führen, dass sich fortan das System (der Hang, die Rutschung) komplett anders verhält als zuvor (Huggel et al., 2012a).

In Gebieten, in denen auf Grund der Klimaerwärmung die Gletscher abschmelzen und der Permafrost degradiert, werden vor allem mehr Fels- und Bergstürze sowie auch Muren erwartet (Stoffel und Huggel, 2012). Es könnte aber auch die Rutschungsaktivität im vom Permafrost frei werdenden Moränenmaterial oder Schutthalden zunehmen.

In der Analyse ob eine potentiell beobachtete Zunahme von Rutschungen tatsächlich auf eine Klimaänderung zurückzuführen ist, darf der Einfluss menschlicher Aktivitäten in den Geosystemen nicht unberücksichtigt bleiben (siehe auch Abschnitt 4.1.3). So können sämtliche Eingriffe des Menschen zu weit größerer Erhöhung der Rutschgefährdung führen als die potentiellen Folgen des Klimawandels (Crozier, 2010). Über die 3 000 Rutschungen in der Steiermark 2009 berichten Hornich und Adelwöhrer (2010) ebenfalls davon, dass bei der überwiegenden Anzahl anthropogene Einflüsse mitverantwortlich für das Auftreten dieser waren.

Abschließend muss festgehalten werden, dass es derzeit noch keine unwiderlegbaren Studien gibt, die eine Veränderung der Frequenz und Magnitude von Rutschungen oder gravitativen Massenbewegungen im Allgemeinen einzig und allein auf Klimaveränderungen zurückführen können (siehe auch Huggel et al., 2012b). Dies gilt auch für die erwähnte Häufung von Extremereignissen in Österreich bzw. in der Steiermark. Trotz Häufung mögen diese dennoch singuläre Ereignisse sein, die noch im Rahmen der natürlichen Variabilität liegen.

In weiteren Forschungsarbeiten sind v. a. die Auswirkungen der regional unterschiedlichen Niederschlagstrends und -vorhersagen für Österreich (vgl. Band 1, Kapitel 3 und Kapitel 4) in Kopplung mit den Veränderungen der Temperatur, der Verdunstung und der Schneedeckendauer unter Berücksichtigung der Anfälligkeit der verschiedenen Lithologien und des menschlichen Einflusses detailliert zu studieren. Zielführend wären auch Verbesserungen in der Auflösung der regionalen Klimamodelle, um verlässlichere Vorhersagen für alle Klimaparameter zu erhalten, die nachfolgend in die Studien über die sich verändernden Hanginstabilitäten zu berücksichtigen wären. Sämtliche Analysen sollten getrennt für flachgründige und tiefgründige Rutschungen untersucht werden, da diese unterschiedlich sensitiv auf verschiedene Veränderungen reagieren.

Mure

Murgänge sind eine Sonderform der gravitativen Prozesse, die durch eine Suspension aus Wasser und Feststoffen (Geschiebe und Wildholz) gebildet werden. Dieser Naturprozess stellt eine nicht unbeträchtliche Gefahr für besiedelte Regionen im Alpenraum dar. Als vorherrschende Auslöser für Muren in alpinen Regionen sind intensive Niederschlagsereignisse, sowie Schneeschmelze und/oder eine Kombination aus beiden zu nennen. Es können aber auch andere Faktoren wie Erdbeben oder menschliche Aktivitäten zur Entstehung solcher Wildbachprozesse beitragen. Die Dichte dieses Wasser-Feststoff-Gemisches liegt zwischen 1700 kg/m^3 und 2400 kg/m^3, wobei eine volumetrische Feststoffkonzentration von 40 % bis 70 % typisch ist (Pierson und Costa, 1987). Muren können als einzelne Welle, oder zusammengesetzt aus mehreren Wellen, sogenannte Murschüben, auftreten (vgl. ONR 24800, 2009). Aufgrund der komplexen Wechselwirkungen zwischen bodenmechanischen Eigenschaften, Niederschlags- und Abflussbedingungen sowie limitierter Daten gibt es nur grobe Abschätzungen über Frequenz und Magnituden von Muren (Hübl et al., 2011a). Ihr Auftreten wird sowohl von den klimatischen Verhältnissen, als auch von den geomorphologischen Gegebenheiten bestimmt. Deshalb können klimatische Veränderungen einen starken Einfluss auf die Disposition zu Murgängen ausüben und eine Änderung des Gefahrenpotentials mit sich bringen. Um eine mögliche Auswirkung des Klimawandels auf die zukünftige Disposition von Murgängen und das daraus resultierende Gefahrenpotential abschätzen zu können, ist ein besseres Verständnis ihrer Auslösemechanismen nötig. Dies kann im Wesentlichen nur aus möglichst vielen Informationen über vergangene Ereignisse gewonnen werden. Die Schwierigkeit besteht hierbei darin, dass durch die Klimaveränderungen die früheren Beziehungen zwischen Murinitiierung und dem hydrometeorologischen Auslöser in Zukunft nicht in der bisherigen Form Bestand haben werden.

Da Murgänge bzw. mur-artige Feststofftransporte in alpinen Einzugsgebieten hauptsächlich durch lokale Wärmegewitter und lang anhaltende Niederschlägen (Landregen) hervorgerufen werden (vgl. Berti et al., 1999; Marchi et al., 2002) ist anzunehmen, dass der Klimawandel einen direkten Einfluss auf ihre Frequenz und Magnitude hat (Stoffel, 2010). Studien zum Klimawandel zeigen, dass es in den Alpen zu einer erhöhten Niederschlagsvariabilität und damit zu einer regional und saisonal unterschiedlich starken Zunahme extremer Niederschläge kommen kann (Christensen und Christensen, 2004; BMU, 2007; Frei et al., 2007; Dèquè, 2007).

In hochalpinen Lagen ist zu erwarten, dass durch den Anstieg der mittleren und der maximalen Temperatur das Schmelzen der Gletscher und die Degradation des Permafrostes beschleunigt werden (Stoffel und Huggel, 2012). Durch Schwinden des Permafrosts aus Schuttkörpern (z.B. Blockgletscher) oder wenn neues nicht stabil lagerndes Moränenmaterial durch die Gletscherschmelze freigelegt wird, kann sich die Grunddisposition innerhalb weniger Dekaden ändern (Zimmermann et al., 1997). Folglich werden durch die Änderungen der thermischen Bedingungen im Untergrund Hänge instabil und die potentielle Materialverfügbarkeit erhöht. Die Auslösung von Murgängen wird somit begünstigt.

Somit lässt sich vermuten, dass die Magnitude von Muren durch die konstante Temperaturerhöhung zunehmen wird (Stoffel et al., 2011). Welche Auswirkungen auf die Frequenz von Muren zu erwarten sind muss noch detaillierter untersucht werden. Kenntnisse über vergangene Ereignisse in Verbindung mit regionalen bzw. lokalen Klimamodellen sind für alle Zukunftsszenarien unabdingbar. Mit einem episodischen, schwer vorhersehbaren Auftreten solcher Ereignisse ist jedenfalls auch in Zukunft zu rechnen. Mögliche Klimawandelfolgen auf Wildbachgefahren, mit Fokus auf Frequenz- und Magnitudenänderungen, werden u.a. in den ACRP finanzierten Projekten DEUCALION und ClimCatch anhand repräsentativer Einzugsgebiete in Österreich untersucht.

Steinschlag und Felssturz

Unter Steinschlag und Felssturz versteht man frei fallende oder springende Gesteinsbruchstücke an Felswänden oder steilen Hängen. Hinsichtlich des Volumens lässt sich eine grobe Dreigliederung vornehmen. Steinschlag (engl. debris fall) umfasst häufige, kleinere Abstürze von Steinen bis zu einem Volumen von ca. 10 m^3 (z.B. Whalley, 1984). Die nächstgrößeren Magnitude der Felsstürze ist im deutschsprachigen Raum sehr unscharf abgegrenzt (z.B. Ahnert, 2003) und liegt zwischen Steinschlag und Bergstürzen. Letztere beginnen ab einer Magnitude von ca. 10^6 m^3 (z.B. Abele, 1974). Durch das oft steile Relief bedingt, zählen Sturzprozesse zu den bedeutendsten und am weitesten verbreiteten Naturgefahren im österreichischen Alpenraum, von denen eine erhebliche Gefährdung für Siedlungen und Infrastruktur ausgehen kann.

Auslöser für Steinschläge und Felsstürze können Erdbeben, anthropogene Aktivität oder meteorologische Parameter sein, deren Veränderung im Kontext des Klimawandels auf Magnitude und Frequenz einwirken kann. Steinschlag reagiert in der Regel auf kurzfristige Schwankungen von Temperatur und Wassergehalt, wie z.B. bei Starkregen oder täglichen bzw.

jährlichen Frostwechseln. Dabei sind die Steuerparameter vielfältig und noch nicht zur Gänze verstanden – Gefrierrate, Frosttiefe und Feuchtegehalt spielen komplex zusammen (Sass, 2005). Eine möglichst lange Andauer von Temperaturen im sogenannten „frost cracking window“ zwischen ca. –3 und –8 °C wird dabei als besonders verwitterungswirksam angesehen (z. B. Anderson und Anderson, 2010). Ferner erhöht das Vorhandensein von Permafrost im Fels generell die Wirksamkeit der Frostverwitterung (Murton et al., 2001), weshalb in von Permafrost erfüllten Felswänden höhere Steinschlagraten beobachtet werden können. (z. B. Sass, 2010). Auch für Felsstürze wurden bereits verschiedene und zum Teil widersprüchliche Auslöser genannt. Die Wichtigkeit von Niederschlagsphasen wurde ebenso herausgestellt (z. B. Krähenbühl, 2004) wie eine positive Korrelation mit der Temperatur (Perret et al., 2006). Nach Gruner (2008) bewirken kalte Winter Kontraktion und Kluftbildung im Gestein. Auslöser des Sturzprozesses ist dann häufig hydrostatischer Porendruck durch Regenfälle und Schmelzwässer, weshalb im Jahresverlauf das zeitliche Maximum von Felsstürzen oft im Frühjahr liegt.

Aufgrund der Vielzahl möglicher meteorologischer Einflussfaktoren lassen sich die Auswirkungen des aktuellen Klimawandels auf die Frequenz von Sturzereignissen schwer abschätzen. Durch die Erwärmung im Alpenraum werden sich die Zonen maximaler Frostwechselintensität nach oben verschieben, die erreichte Wahrscheinlichkeit für extreme Minimaltemperaturen wird tendenziell abnehmen. Eine durchgreifende, monokausale Ab- oder Zunahme verwitterungsaktiver Wetterlagen ist angesichts des komplexen Zusammenspiels von Feuchte und Temperatur jedoch nicht zu erwarten. Bei Degradation des Permafrosts ist kurzfristig in der entsprechenden Höhenlage wegen der starken Aufbereitung des Gesteins eine höhere Steinschlagintensität zu erwarten, mittelfristig (in Jahrzehnten bis Jahrhunderten) ist jedoch mit einer Stabilisierung zu rechnen.

Eine erhöhte Felssturztätigkeit wird jedoch als eine direkte und möglicherweise überraschend schnelle Reaktion auf die Erwärmung in Permafrostregionen angesehen (Gruber et al., 2004a). Diese Befürchtung wurde im warmen Jahrhundertsommer 2003 bestätigt, in dem alpenweit eine erhöhte Anzahl von Felsstürzen dokumentiert wurde, insbesondere in großer Höhe und an nordexponierten Hängen der Schweizer Alpen (z. B. Gruber et al., 2004a; Nötzli et al. 2004). Felsstürze sind von einer fortschreitenden Permafrostdegradation besonders stark betroffen, da die zu erwartenden Auftautiefen im Meterbereich liegen und damit die für die Auslösung von Stürzen dieser Magnitude relevanten Felsbereiche erfassen. Auch die Erwärmung von Eis in Klüften ohne tatsächliches Schmelzen wurde bereits als möglicher Trigger von Felsstürzen identifiziert, da die Scherfestigkeit von Eis nahe dem Schmelzpunkt deutlich zurückgeht (Krautblatter und Funk, 2010). Außerdem wird ein überraschend schnelles Auftauen wegen des Transports von latenter Wärme durch Schmelzwasser diskutiert. Deline et al. (2008) führten mehr als die Hälfte der 2007 / 2008 beobachteten Sturzereignisse im Montblanc-Gebiet auf Permafrostdegradation zurück. In Österreich wurde von Kellerer-Pirklbauer et al. (2012b) ein großes Felssturzereignis im Jahr 2007 aus dem unteren Randbereich der Permafrostverbreitung am Pasterze-Gletscher dokumentiert. Ebenfalls unter Beobachtung sind massive Hangdeformationen und sukzessive Fels- und Eisstürze im Bereich der Bliggspitze im Kaunertal (Krautblatter et al., 2009; Fey et al., 2010). Gefährdete Bereiche sind naturgemäß in den Hochlagen insbesondere der Tiroler Alpen anzutreffen, aufgrund der geringen Siedlungsdichte stellen sie jedoch nur ein begrenztes Gefahrenpotenzial für Gebäude und Infrastruktur dar. Gefährdet sind vorwiegend exponierte touristische Einrichtungen (z. B. Seilbahnstationen, Liftstützen) sowie einzelne Wanderende und BergsteigerInnen. Die Begehbarkeit zahlreicher alpiner Übergänge in Gletschernähe hat nach Aussagen der Alpenvereine erheblich gelitten, vielfach mussten bereits Wege verlegt werden.

Während erhöhte Felssturzhäufigkeit aus Bereichen von degradierendem Permafrost als ziemlich gesichert betrachtet werden kann, kann im erheblich größeren permafrostfreien Anteil von 97 % des österreichischen Alpenraums in den letzten Jahrzehnten keine Zunahme von Felssturzereignissen beobachtet werden. Auch im Jahrhundertsommer 2003 konnte österreichweit gesehen kein signifikanter Anstieg der Felssturztätigkeit festgestellt werden (Sass und Oberlechner, 2012). Auch Gruner (2008) konstatierte anhand von Felssturzdaten aus der Schweiz, dass eine mit der aktuellen Klimaerwärmung zu parallelisierende Zunahme von Felsstürzen nicht feststellbar ist und nach Ansicht des Autors auch in näherer Zukunft nicht zu erwarten ist. In warmen Perioden, wie etwa den letzten ein bis zwei Jahrzehnten, wurde jedoch sowohl in Österreich als auch in der Schweiz eine Verschiebung des Maximums der Felssturztätigkeit vom Frühjahr in den Sommer festgestellt (Gruner, 2004; Sass und Oberlechner, 2012). Ob dies an einem Rückgang der Frühjahrsaktivität aufgrund von milden Wintern oder an einer Zunahme der Sommeraktivität aufgrund von häufigeren Starkregen liegt, kann momentan (2013) noch nicht beantwortet werden.

Gesicherte Aussagen werden auch dadurch erschwert, dass kaum verlässliche, homogene Datensätze vorliegen, die wenigstens einige Jahrzehnte in die Vergangenheit zurückreichen. Eine tatsächliche Zu- oder Abnahme lässt sich damit

statistisch momentan noch schwer nachweisen. Zum anderen konzentrieren sich zur Zeit viele Forschungsaktivitäten auf die Permafrostgebiete in den Hochlagen der Alpen, während die gefährdete Infrastruktur oft in den Tallagen weit unterhalb der Permafrostgrenze liegt. Das stark gestiegene mediale Interesse und die oft erst seit wenigen Jahren aufgebauten Kataster führen zwangsweise zu einer starken Konzentration von bekannten Sturzereignissen auf die letzten 10 bis 20 Jahre (Sass und Oberlechner, 2012). Diesen scheinbaren Anstieg unreflektiert auf Klimaänderungen zurückzuführen, sollte vermieden werden.

Zusammenfassend kann somit festgestellt werden, dass die fortschreitende Erwärmung mit hoher Wahrscheinlichkeit innerhalb der kommenden Jahrzehnte in den von Permafrost beeinflussten Hochlagen zu einer verstärkten Felssturztätigkeit führen wird, die potenzielle Probleme vor allem für die touristische Infrastruktur und exponierte Verkehrswege verursachen kann (Lan et al., 2010; Krumm et al., 2011). Für den bei weitem größten Teil der Landesfläche lässt sich noch keine statistisch gesicherte Aussage treffen, zu vermuten ist jedoch eine kaum veränderte Gefährdungslage. Felsstürze, die reliefbedingt die besiedelten Tallagen gefährden, werden weiterhin auftreten, für eine aktuelle Zunahme gibt es jedoch momentan keinen Beleg.

Tiefgründige Massenbewegungen

An glazial übersteilten Hangflanken alpiner Täler treten neben verschiedenen flachgründigen Massenbewegungen (z. B. Steinschlag, Felsstürze, Muren) häufig auch tiefgründige Hangverformungen unterschiedlicher geometrischer und kinematischer Ausprägung auf (Felsgleitungen > 10 m Mächtigkeit, Bergstürze > 1 Mio. m³). Hinsichtlich der Bewegungsaktivität sind rasche Felsgleitungen und Bergstürze (Verformungsraten m / s) mit z. T. großen Reichweiten (Sturzströme – bis zu mehrere Kilometer) von langsamen, „kriechenden“ Felsgleitungen (Verformungsraten mm / a bis m / a) zu unterscheiden (Cruden und Varnes, 1996). Allgemein werden tiefgründige Massenbewegungen von einer komplexen Wechselwirkung verschiedener geologischer und hydrogeologischer Ursachen mit fels- bzw. bodenmechanischen und klimatischen Prozessen charakterisiert. Wesentlich sind progressive Bruchbildungsprozesse (Wachstum und Vernetzung von Trennflächen), die zu einer zeitabhängigen Verminderung der Gebirgsfestigkeiten und zur Bildung von basalen Ablöse- und Bewegungszonen führen (z. B. Turner und Schuster, 1996; Evans et al., 2006; Clague und Stead, 2012). Diese Prozesse werden durch verschiedene, sich gegenseitig in Raum und Zeit überlagernde bzw. beeinflussende Faktoren bestimmt (z. B. Geologie, Hydrogeologie, In-situ Spannungen, Erdbeben, Klima).

Informationen über die Ursachen und Auslöser von tiefgründigen Massenbewegungen sind durch fossile Ablagerungen, historische Ereignisdokumentationen und aktuelle Beobachtungen und Messungen gegeben. Altersdatierungen von fossilen Bergstürzen und raschen Felsgleitungen zeigen zwar zeitliche Anhäufungen im frühen und mittleren Holozän, wobei aber Ursachen und mögliche Auslöser (z. B. Klima, Erdbeben, geänderte In-situ Spannungen) derzeit noch nicht schlüssig geklärt sind (Prager et al., 2008). Auswertungen von rund 800 historischen Sturzereignissen ergeben für den Zeitraum von 1500 bis 1900 keinen eindeutigen Zusammenhang mit bekannten Feucht- oder Warmphasen; für das 20. Jahrhundert weisen diese Daten auf einen Zusammenhang mit dem Witterungsverlauf hin, indem kältere Temperaturen und verstärkte Niederschläge mit einem vermehrten Auftreten von Sturzereignissen korrelieren (Gruner, 2006).

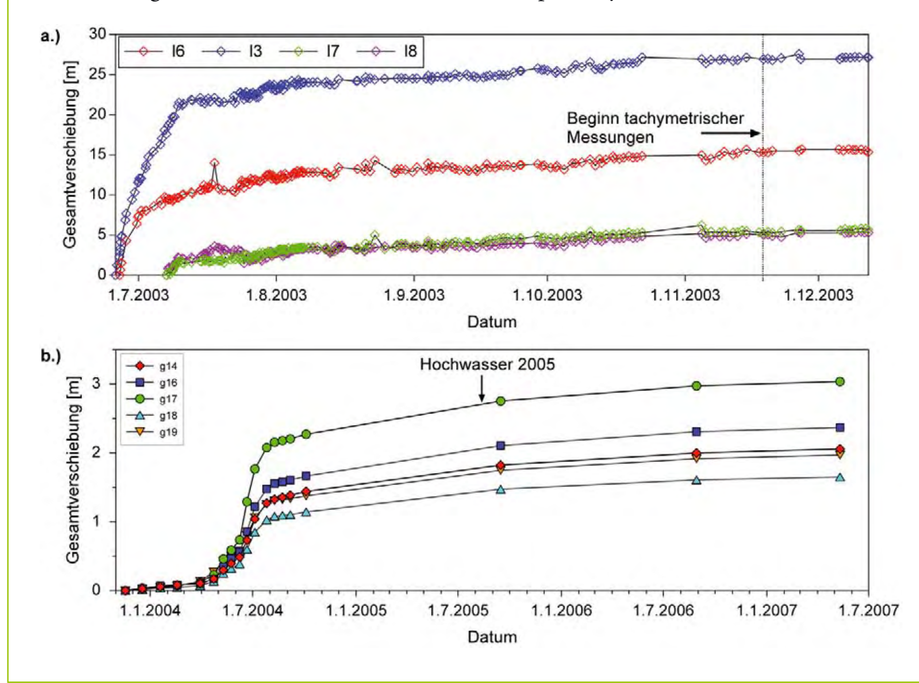
Dem gegenüber zeigen rezente Messungen an langsamen tiefgründigen Felsgleitungen, dass gravitative Hangbewegungen sowohl zeitlichen Beschleunigungs- aber auch Stabilisierungsphasen unterworfen sind. Dabei stellt sich nach Phasen höherer Aktivität (Hanggeschwindigkeit) häufig wieder eine „Grundaktivität“ ein, ohne dass irreversible Beschleunigen bis hin zu einem vollständigen Hangversagen auftreten. Die Mechanismen, die zu Änderungen des kinematischen Verhaltens führen sind äußerst komplex und durch Kombinationen verschiedenster Faktoren geprägt. Zeitlich und räumlich variierende Hanggeschwindigkeiten ergeben sich durch Änderungen der Systembedingungen (z. B. Bergwasserspiegelschwankungen, Stauspiegelschwankungen, Hangfußerosion, Erdbeben, fortschreitende Hangdeformation, zeitlich veränderliche Materialeigenschaften der Deformationszonen) bzw. vielfältige Wechselwirkungen.

Hinsichtlich der Entstehung von schnellen Massenbewegungen und des Bewegungsverhaltens von langsamen Felsgleitungen ist der mögliche Einfluss des Klimawandels auf regionaler Maßstabsebene bisher noch nicht detailliert untersucht. Entsprechend dem aktuellen Forschungsstand (z. B. Field et al., 2012) ist durch den Klimawandel mit einer Änderung des Niederschlagsverhaltens und einem Temperaturanstieg, mit einem damit verbundenen Gletscherrückzug und Permafrostabbau, zu rechnen. Konzeptionell betrachtet, können langfristige klimatische Veränderungen das zeitlich variable Deformationsverhalten von langsamen, tiefgründigen Felsgleitungen sowie die Entstehung von raschen Gleitungen / Stürzen durch geänderte Bergwasserverhältnisse und bruchmechanische Prozesse beeinflussen.

Box 4.1: Gesamtverschiebung auf einer hochaktiven Teilscholle einer gravitativen Massenbewegung

Box 4.1: Total displacement of an highly active sliding block of a landslide

Die Komplexität des Verhaltens von tiefgründigen Massenbewegungen spiegelt sich exemplarisch an der Massenbewegung im Steinlehnen / Sellraintal wieder (Zangerl und Engl, 2009). Ende Juni 2003, im Zuge überdurchschnittlich hoher Temperaturen und unterdurchschnittlich niedriger Niederschläge, kam es zur Bildung und Beschleunigung einer Dekameter mächtigen, stark aufgelockerten Teilscholle. An dieser Teilscholle wurden maximale Hanggeschwindigkeiten von über 4 m pro Tag gemessen, wobei sich innerhalb von nur wenigen Wochen Gesamtverschiebungen von über 20 m akkumulierten (Box 4.1 Abbildung 1a). Nach dieser Akutphase der Hangbewegungen, deren Auslösefaktoren weitgehend unbekannt sind, folgte eine kontinuierliche Abnahme der Geschwindigkeiten. Im darauf folgenden Frühjahr 2004 kam es erneut zu Beschleunigungen mit Maximalgeschwindigkeiten von bis zu 4 cm pro Tag (ca. um den Faktor 100 niedriger), die auf die Schneeschmelze zurückgeführt werden können (Box 4.1 Abbildung 1b). Generell zeichnete sich aber eine Verlangsamung der Bewegungen ab, die sich schließlich im Herbst 2004 auf ca. 0,5 mm pro Tag reduzierten. Starkniederschläge im August 2005 konnten zu keiner verstärkten Reaktivierung der Teilscholle führen; d. h. seit 2005 liegen die mittleren Bewegungsraten unter 2 dm pro Jahr (Box 4.1 Abbildung 1b). Insgesamt zeigt das Fallbeispiel Steinlehnen die Schwierigkeiten bei der Erfassung kausaler Auslösefaktoren, die sich zeitlich und räumlich verändern können, denn z. B. auch nur geringe fortschreitende Hangdeformationen beeinflussen das komplexe Systemverhalten.



Box 4.1 Abbildung 1 a) Mit terrestrischem Laserscanner gemessene Gesamtverschiebungen auf der hochaktiven Teilscholle (LiDAR Messfenstern L1–L4), sowie b) tachymetrisch bestimmte Gesamtverschiebungen der hochaktiven Teilscholle (geodätische Reflektoren G1–G5) für das Zeitintervall November 2003 bis Mai 2007

Box 4.1 Abbildung 1 a) Total displacement of the highly active sliding mass obtained from laser scanner measurements (LiDAR scan windows L1–L4), and b) tachymetric measurements (geodetic reflectors G1–G5) of the highly active sliding mass between November 2003 and May 2007

Durch klimatisch bedingte Niederschlagsveränderungen werden die hydrologischen und hydrogeologischen Randbedingungen (z. B. Abflussverhalten, Grundwasserneubildung) beeinflusst, wodurch sich im Gebirge Bergwasserspiegel, Kluftwasserdrucke und hydraulische Gradienten verändern. Als Folgen können hydromechanisch gekoppelte Prozesse (Strömungskräfte, effektive Spannungen) wiederum felsmechanische Bruchprozesse und das Bewegungsverhalten von tiefgründigen Massenbewegungen beeinflussen. So weisen Quellmessungen und geodätische Messkampagnen auf hydromechanisch gekoppelte Prozesse hin, wo variable Kluftwasserdrücke zu messbaren, elastisch reversiblen Oberflächenbewegungen führen (Löw et al., 2007). Langfristig können derartige, klimatisch beeinflusste Prozesse das progressive Risswachstum begünstigen und durch Minderung der Gebirgsfestigkeit auch tiefgründige Massenbewegungen beeinflussen. Zudem kann die Zunahme von Hochwasserereignissen zu verstärkter Erosion im Hangfuß- bzw. Stirnbereich von Mas-

senbewegungen führen und dadurch sekundäre Hanginstabilitäten (Sturz-, Gleit- und Fließprozesse) verursachen. Derartige Massenumlagerungen (häufig in Kombination mit erhöhtem Bergwasserspiegel) verändern den In-situ Spannungszustand im Hangfußbereich und können Reaktivierungen und / oder Beschleunigungen instabiler Hangflanken auslösen (Henzinger et al., 2009; Bonzanigo et al., 2007; Zangerl et al., 2012).

Auch für zahlreiche andere, z. T. besonders umfassend erkundete und mittels verschiedener Monitoringmethoden beobachtete Massenbewegungen sind die prozessrelevanten Faktoren oft schwierig zu bestimmen und allgemeingültige Aussagen zur Hangentwicklung mit Unschärfen behaftet. So finden sich unzählige Fallbeispiele die einen direkten Zusammenhang zwischen der durch Niederschlag / Schneeschmelze beeinflussten hydrogeologischen Situation und der Hangaktivität erkennen lassen (z. B. Bonzanigo et al., 2007; Macfarlane, 2009). Andere tiefgründige Massenbewegungen wiederum zeigen auch trotz langjähriger, umfassender Messungen und Analysen keinen eindeutig nachweisbaren direkten Einfluss von Klima / Witterung auf das Hangverhalten (z. B. Zangerl et al., 2010).

Neben geänderten Niederschlagsverhältnissen können sich auch klimatisch bedingte Temperaturveränderungen auf tiefgründige Massenbewegungen im alpinen Hochgebirge auswirken, nämlich in Form geänderter Permafrostbedingungen und / oder Gletscherständen. In-situ Bohrlochmessungen in geklüftetem Gebirge zeigen, dass der Permafrost in den Alpen bis über 100 m tief reicht (Gruber et al., 2004b; Harris et al., 2003) und damit die Gebirgsfestigkeit durch den Zustand eisgefüllter Klüfte tiefgründig beeinflussen kann. Eine Veränderung der Permafrostverhältnisse (Erwärmung) reduziert die Festigkeit der Klüfte, beschleunigt Bruchprozesse und verringert damit die Gebirgsfestigkeit (Davies et al., 2000; Huggel et al., 2012a, b; Krautblatter et al., 2012). Weiters führt das beobachtete Gletscherrückschmelzen im Hochgebirge zur Entlastung von Hangflanken im Hangfußbereich und damit zu einer ungünstigen Veränderung der In-situ Spannungen. Die in Folge verminderte Standfestigkeit ermöglicht entweder die Reaktivierung oder Beschleunigung bestehender Massenbewegungen und / oder die Bildung von neuen flach- und tiefgründigen Hanginstabilitäten. So zeigen Prozessanalysen von Erkundungs- und Messdaten einer Felsgleitung im Bereich des Eigers / Schweiz eindrucksvoll die destabilisierende Wirkung des fortschreitenden Gletscherrückzugs auf Hangflanken im anstehenden Festgestein (Jaboyedoff et al., 2012). Auch einige andere neuzeitliche Hanginstabilitäten in den Schweizer Alpen werden zumindest teilweise auf klimatisch gesteuerte Gletscher- und Permafrostveränderungen zurückgeführt (Fischer et al., 2012; Huggel et al., 2012a, b).

Diese und zahlreiche andere Fallbeispiele in verschiedenen Gebirgsmassiven (z. B. Deline, 2008; Crozier, 2010; Allen et al., 2011) sowie konzeptionelle Betrachtungen weisen deutlich auf direkte und indirekte Einflüsse des Klimawandels auf tiefgründige Massenbewegungen hin (z. B. Allen et al., 2011; Crozier, 2010; Davies et al., 2000; Deline, 2008; Gruber et al., 2004a, b; Huggel et al., 2012a). Jedoch ist weiterer Forschungsbedarf zwingend gegeben, um lokal und regional das Prozessverständnis tiefgründiger Massenbewegungssystem im Detail zu erhöhen und mit zukünftigen Klimaszenarien in Bezug setzen.

In Bezug auf alle Typen gravitativer Massenbewegungen ist hervorzuheben, dass deren Wirkungsbereich selbstverständlich nicht nur auf die Hanglagen beschränkt ist. Auch Gebiete vor dem Hangfuß und in angrenzenden Talbereichen können potentiell betroffen sein. Neben der Einwirkung auf die dort siedelnde Bevölkerung und Infrastruktureinrichtungen können gravitative Massenbewegungen auch einen großen Einfluss auf die fluvialen Systeme ausüben, beispielsweise durch Abtrag und Anlieferung von Sedimenten, durch Verdrängung von Bächen und Flüssen aus ihrem ursprünglichen Bett oder durch das Aufstauen von Flüssen bei einer vollständigen Blockade des Gerinnes. Diese möglichen Folgewirkungen müssen immer mitbedacht werden, um die vollständigen und umfassenden Konsequenzen der gravitativen Massenbewegungen in den unterschiedlichen Reliefsphären zu berücksichtigen.

4.2.2 Schneelawinen

In Österreich wurden in den letzten zwei Jahrzehnten mehrere Studien zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Schneedecke durchgeführt (Mohnl, 1991; Hantel et al., 2000; Schöner et al., 2009, vgl. auch Band 2, Kapitel 2). Diese beschränken sich zumeist auf Änderungen in den Schneehöhen und / oder der Dauer der Schneedecke. Aussagen über die Lawinenaktivität sind dagegen nur bedingt möglich. In einigen Studien wurde versucht einen Zusammenhang zwischen Hauptwetterlagen, bzw. Zirkulationsmustern und der Schneehöhe zu finden (z. B. Schöner et al., 2009), jedoch ist die Korrelation nicht sehr aussagekräftig. Dobesberger und Zeidler (2010) beschreiben in einer Studie gezielt die Auswirkungen von möglichen Klimaänderungen auf den Naturgefahrenprozess durch Lawinen. Der Studie zur Folge konnte kein signifikanter Trend in der Anzahl von Lawinen gefunden werden, jedoch konnte in den Untersuchungsgebieten gezeigt werden, dass der Anteil von Nass- gegenüber Trockenschneelawinen zunimmt. Diese Beobachtungen decken sich mit den Ergebnissen der Studien von Martin et al. (2001), Laternser und Schneebeli (2002) und Eckert et al. (2010a, b).

Eine quantitative statistische Analyse der Lawinenaktivität ist limitiert, da die Lawinenaufzeichungen mit großen Unsicherheiten verbunden sind. Die Datenqualität und Vollständigkeit ist von dem / der jeweiligen BeobachterIn abhängig und in der Vergangenheiten wurden häufig nur Lawinenabgänge aufgezeichnet, welche einen hohen wirtschaftlichen Schaden verursachten (Hug, 2012). Zudem wurden in Österreich viele Anbruchgebiete über Siedlungsgebieten durch technische Verbauungen gesichert und somit ein Lawinenabbruch weitestgehend verhindert (Voigt et al., 2010). Deutlicher als den Klimawandel erkennt man in diesen Datensätzen somit die gesellschaftliche Entwicklung über die letzten Jahrzehnte hinweg.

Anhand der Ergebnisse der oben angesprochenen Studien und durch Interpretation von physikalischen Zusammenhängen werden im Folgenden mögliche Auswirkungen der prognostizierten Änderungen in den Klimaparametern Temperatur, Niederschlag und Wind auf den Schneedeckenaufbau und damit auf die Lawinenaktivität erläutert. Dabei werden die vier typischen Lawinensituationen (*Neuschnee, Triebschnee, Nassschnee und Altschnee*), die für die Mehrzahl der Lawinenereignisse verantwortlich sind (Harvey et al., 2012; Mair und Nairz, 2010), in Hinblick auf mögliche Änderungen infolge des Klimawandels diskutiert. Eine Quantifizierung der Änderung der Lawinenaktivität ist aufgrund der oben angesprochenen Unsicherheiten in den Lawinenaufzeichnungen nicht möglich. Die Annahmen in Bezug auf erwartete Klimaänderungen in Österreich sind dabei a) ein Anstieg der Lufttemperatur, b) eine Zunahme der Jahresniederschlagssummen (insbesondere eine Intensivierung nördlich des Alpenhauptkammes im Winter) und c) ein geringer Anstieg der Windgeschwindigkeiten (Beniston et al., 2007, vgl. auch Band 1, Kapitel 4).

Große Neuschneemengen sind mitunter eine der Hauptursachen für die Auslösung von *Neuschneelawinen*. In Hinblick auf die Szenarien zu Änderungen der Lufttemperatur und des Niederschlags und aufgrund der Tatsache, dass Neuschnee von einem Zusammenspiel beider Klimaparameter abhängt, können folgende Aussagen in Bezug auf Lawinen getroffen werden. Jene Bereiche der Alpen, die bei NW-Wetterlagen zuerst angeströmt werden, haben mit einer Zunahme an Staueniederschlägen zu rechnen (Beniston et al., 2007). In Anbruchgebieten unterhalb der Baumgrenze ist mit einem deutlichen Rückgang des festen Anteils am Niederschlag (vgl. Band 1, Kapitel 3) und damit verbunden mit einem Rückgang von Lawinen infolge von intensiven Neuschneefällen zu rechnen. In höher gelegenen Einzugsgebieten kann es zu einer Zunahme der Neuschneemengen kommen, allerdings wird die Dichte von Neuschnee aufgrund höherer Temperaturen steigen. Grundsätzlich kann man nicht direkt von der Mächtigkeit einer Schneedecke auf die mechanische Stabilität schließen. Im Allgemeinen verfestigt sich eine Schneedecke bei höheren Temperaturen schneller, außer die Temperaturzunahme erfolgt so rasch, dass Spannungen in der Schneedecke entstehen, die in weiterer Folge zu Lawinen führen können (McClung und Schaerer, 1993). Laternser und Schneebelli (2002) haben keine Zunahme der Lawinenaktivität über die letzten 50 Jahre in der Schweiz festgestellt, obwohl eine Zunahme der Niederschlagsmenge dies vermuten ließe. Die Autoren führen dies auf den verstärkten Einsatz von Lawinenschutzmaßnahmen zurück, haben jedoch den Schneedeckenaufbau nicht zusätzlich berücksichtigt.

Triebschnee erhöht in vielen Fällen die Lawinengefahr. Bereits wenige Stunden Schneedrift können große Mengen Schnee verfrachten (McClung und Schaerer, 1993; Mair und Nairz, 2010). Da kleinräumige Vorhersagen der Windgeschwindigkeit nur über einige Stunden oder Tage möglich sind, werden für Klimavorhersagen daher indirekte Größen (Luftdruckverteilung) herangezogen, aus denen sich großskalige Windgeschwindigkeiten abschätzen lassen. Studien gehen davon aus, dass die Windgeschwindigkeiten von Stürmen im Winter in Mittel- und Nordeuropa zunehmen werden; allerdings ist der Alpenraum weniger stark betroffen (Beniston et al., 2007; Munich Re, 2002). Südlich der Alpen wird mit einer Abnahme der Windgeschwindigkeiten gerechnet. Die Strömungsmuster zeigen, dass in Zentraleuropa vermehrt NW-Lagen auftreten werden. Da sich Triebschnee im Lee von Hindernissen (Bergen) bildet, sind ost- bis süd-exponierte Hänge stärker betroffen. Gefährliche Triebschneeansammlungen entstehen entweder, wenn während des Niederschlags starker Wind vorherrscht oder, wenn abgelagerter Schnee nur schwach gebunden ist. Die Strahlung, die Lufttemperatur und -feuchte beeinflussen die Verfestigung der Schneedecke (Gabl und Lackinger, 1996). Der Einfluss des Klimawandels auf die Zu- oder Abnahme von Triebschneelawinen hängt also nicht nur mit den Veränderungen der Windgeschwindigkeiten zusammen.

Im Hinblick auf steigende Temperaturen und damit verbundene höhere Schmelzraten, sowie auf eine Zunahme von Regen-auf-Schnee-Ereignissen kann davon ausgegangen werden, dass die Schneedecke vor allem in tiefen Lagen stärker durchfeuchtet wird. Mit zunehmendem Flüssigwassergehalt verliert die Schneedecke an Festigkeit (Bhutiyani, 1994). Zusätzlich kann sich Wasser an Schichtgrenzen innerhalb der Schneedecke oder der Grenzschicht zum Untergrund stauen wodurch potentielle Gleitschichten entstehen. Demzufolge

kann davon ausgegangen werden, dass vor allem in tieferen Lagen *Nassschneelawinen-* und *Gleitschneelawinen*ereignisse häufiger auftreten werden.

Während Lockerschneelawinen häufig nach Neuschneefällen oder aufgrund von oberflächennaher Durchfeuchtung (starke Einstrahlung oder Regen) zu beobachten sind, bilden sich *Schneebrettlawinen* durch einen Bruch in einer Schwachschicht im Altschnee oder an der Schichtgrenze zwischen Alt- und Neuschnee (McClung und Schaerer, 1993). Zu den häufigsten Schwachschichten, die auch über einen längeren Zeitraum erhalten bleiben, zählen eingeschneiter Oberflächenreif und durch die aufbauende Metamorphose entstandene kantige Schneekristalle (kantige Vollformen). Ob und wie viele dieser Schwachschichten in der Schneedecke auftreten, ist vom Witterungsverlauf abhängig. Ganz allgemein gilt, dass höhere Temperaturen die Verfestigung der Schneedecke unterstützen und weniger langlebige Schwachschichten (kantige Formen) entstehen, da für deren Bildung ein großer Temperaturgradient in der Schneedecke und damit niedrige Temperaturen an der Schneeoberfläche auftreten müssen (McClung und Schaerer, 1993). Eine Zunahme der Anzahl von Regenereignissen kann einerseits dazu führen, dass Schichten, welche einen ungünstigen Schneedeckenaufbau charakterisieren (z. B. eingeschneiter Oberflächenreif) abgebaut werden aber andererseits auch zu einem Verlust der Festigkeit beitragen. Ein Bruch in tieferen Schwachschichten in der Altschneedecke ist bei einer rapiden Zunahme der Schneeauflast zu erwarten.

Veränderungen der Lawinenaktivität können aus Änderungen der Schnee- und Wetterverhältnisse sowie aus Veränderungen der Landnutzung und Vegetation resultieren. Dabei spielt die Bewaldung eine große Rolle.

Teich et al. (2012) konnten in der Schweiz für die letzten 41 Jahre eine Abnahme der Tage mit Lufttemperatur-, Strahlungs-, Niederschlags- und Schneeverhältnissen feststellen, welche die Auslösung von Waldlawinen begünstigen. Die Daten der österreichischen und der schweizerischen Waldinventur und Arealstatistik sowie lokale Fallstudien zeigen für die letzten drei Jahrzehnte eine Zunahme der Schutzwaldfläche und im Wald eine Zunahme der Überschirmung, des Vorrats und der Stammzahl (Duc und Brändli, 2010; Teich et al., 2012; Perzl et al., 2012). Es ist in den letzten 50 Jahren in den Alpen auch zu einer Verdichtung des Waldes an der Waldgrenze, nicht jedoch zu einem erwärmungsbedingten erheblichen Anstieg der Waldgrenze gekommen (Perzl et al., 2012).

In der Schweiz betragen nach Zimmermann et al. (2006) und Gehrig-Fasel et al. (2007) der maximale Anstieg der lokalen Waldgrenzen zwischen 1979/1985 und 1992/1997 im Durchschnitt 39,7 Höhenmeter (Median 28,0 m; 2,3 bis 3,3 m maximaler Anstieg pro Jahr). Die meisten Waldgrenzenanstiege waren sehr gering. Die Zunahme der Waldfläche an der Waldgrenze ist überwiegend eine Verdichtung innerhalb des Waldgrenzökotons, jedoch kein Höhenanstieg. Dabei muss auch berücksichtigt werden, dass bestockte Flächen bereits ab 20 % Überschirmung und Strauchflächen zum Wald gezählt wurden. Nur 18 % der angestiegenen Waldflächen wurden als Wald im engeren Sinn klassifiziert. Die Analysen beziehen sich auf den maximalen lokalen und nicht auf den mittleren Anstieg. Die Hauptursache des Anstiegs waren Veränderungen der Landnutzung. Nur etwa 4 % dieses Waldflächenanstiegs geht auf klimatische Faktoren zurück (Zimmermann et al., 2006; Gehrig-Fasel et al., 2007). In Österreich gibt es keine für solche Analysen geeigneten Waldflächendaten. Regionale und lokale Studien zeigen aber ähnliche Tendenzen. Stützer (2002) stellte auf der Saualpe in Kärnten eine Verdichtung der Baumbestände im Waldgrenzökoton in den letzten 60 Jahren fest. Die Waldgrenze hat sich aber noch nicht nach oben verschoben. Stützer (2002) rechnet noch mit einigen Jahrzehnten, bis diese Verdichtung zu einem Anstieg der Waldgrenze um etwa 50 Höhenmeter führen wird. Untersuchungen an der oberen Waldgrenze im Oberen Zemmgrund im Zillertal (Tirol), ergaben für den Zeitraum 1955 bis 2004 eine erhebliche Flächenzunahme des Zirbenwaldareals, die ebenfalls überwiegend eine Zunahme und Verdichtung von Verjüngungsbereichen innerhalb bestehender Baum- und Jungwuchsgruppen ist (Pindur et al., 2007). Stepanek et al. (2009) stellten durch Luftbildvergleiche für den Zeitraum 1950 bis 2000 einen mittleren Anstieg der Waldgrenze im Tiroler Paznauntal von 20 Höhenmetern fest. Daraus lassen sich Höhenanstiege der Waldgrenze von durchschnittlich ca. 0,4–0,6 m pro Jahr in den letzten 50–60 Jahren abschätzen. Geht man von einem Anstieg der Lufttemperatur in Österreich von etwa 1,1 °C während dieses Zeitraums aus, ist nach Grace et al. (2002) ein klimabedingter mittlerer Anstieg der Waldgrenze von durchschnittlich 1,6 Höhenmetern pro Jahr, also etwa das Dreifache, zu erwarten. Die relativ geringe Reaktion der alpinen Waldgrenze (im Sinne der obersten Front der als Wald definierten Flächen) trotz Erwärmung und Hochlagenaufforstungen kann auf die dort immer noch extremen Bedingungen und auf von Menschen verursachte Einflüsse (Beweidung, Wildeinfluss) zurückgeführt werden (Grace et al., 2002). Der Wald muss erst die gerodeten Gebiete unterhalb der bisherigen potenziellen natürlichen Waldgrenze rückerobern. Welche Umweltfaktoren die Ausbildung der natürlichen (klimatischen) Waldgrenze bestimmen, das ist noch nicht eindeutig geklärt (Grace et al., 2002). Im Waldgrenzökoton werden weiterhin Extremereignisse (zum Beispiel Frost, Lawinen) die

Ausbreitung des Waldes nach oben behindern (Wieser 2012, zit. nach Perzl et al., 2012).

Durch die Verdichtung des Waldes hat auch die von der Walddichte beeinflusste Schutzwirkung des Waldes gegen Lawinen zugenommen (Teich et al., 2012; Perzl et al., 2012). Das bestätigt sich auch dadurch, dass seit etwa 1990 nur sehr wenige und kleine Schadenslawinen direkt aus dem Wald dokumentiert wurden (Perzl und Walter, 2012). Es gibt aber auch Argumente dafür, dass über diese mittelfristigen Trends hinaus im Grenzsaum zwischen montanen und subalpinen Lagen langfristig die Grunddisposition für Lawinenanbrüche im Wald zunehmen könnte (Perzl und Walter, 2012). Im oberen Bereich der heutigen montanen Stufe könnte in Zukunft ein höherer Regenanteil am Winterniederschlag in Verbindung mit der bereits beobachteten stärkeren Erwärmung und Strahlung im Frühjahr (Auer et al., 2007; vgl. Band 1, Kapitel 4) häufiger Nassschneesituationen bewirken, bei denen die Schutzwirkung des Waldes vor Lawinenanbrüchen geringer ist (Perzl und Walter, 2012). Im Bereich sehr steiler Hänge, der Lawinenschneisen und Rinnen, ist keine generelle Verdichtung des Waldes belegt (Lardelli und Bebi, 2005; Bebi et al., 2009; Perzl et al., 2012). In Österreich hat nach der Österreichischen Waldinventur (ÖWI) die Fläche der Rinnen, Runsen und Lawinenzüge im Wald von der Periode 1992/1996 bis 2007/2009 von 20 000 auf 23 000 ha leicht zugenommen (Perzl, 2012 unveröffentlicht). Möglicherweise ist das eine Folge erhöhter Lawinenaktivität (auch Mur- und Steinschlagaktivität) im tiefsubalpinen und hochmontanen Bereich durch die Erwärmung. Jedoch liegt diese Zunahme noch im Bereich der Stichprobenfehler.

Die Tatsache, dass viele Faktoren die Stabilität der Schneedecke beeinflussen, macht es schwierig, das Anbrechen von Lawinen exakt vorherzusagen. Aussagen über den Einfluss des Klimawandels auf die Lawinenaktivität sind daher nur allgemein formulierbar und zum jetzigen Zeitpunkt nicht quantifizierbar. Einzig in der Aussage, dass sich der Anteil von Naßschneelawinen gegenüber Trockenschneelawinen in den Alpen erhöht sind sich die zitierten AutorInnen einig, wobei dies v. a. auf den Temperaturanstieg zurückzuführen ist.

4.2.3 Periglaziale Prozesse

Der Periglazialbereich wird durch frost- und kaltklimatische Prägung sowie durch frostinduzierte Prozesse wie Frostsprengung, Solifluktion und Kryoturbation charakterisiert.

Periglaziale Gebiete sind in der Umgebung von Gletschern, in gletscherfreien Hochgebirgsregionen sowie Polar- und Subpolarregionen zu finden. Periglaziale Prozesse setzen das Vorhandensein von Frostbedingungen im Untergrund (Festgestein, Lockermaterial, Boden) voraus. Dabei ist zwischen intensiven Frostwechseln, saisonalem Frost und Permafrost zu unterscheiden. Diese Bedingungen treten in den Alpen in der subnivalen bzw. periglazialen Höhenstufe auf. Folgende dem periglazialen Reliefsystem zugeordnete Prozesse sind in Österreich zu differenzieren: Solifluktion und Bodenkriechen, Kriechen von Lockergesteinsmassen sowie Hebungs- und Setzungsvorgänge durch Tau- und Gefrierzyklen (temporärer Frost und Permafrost). Diese Prozesse führen zu charakteristischen Landformen wie Solifluktionsloben, Blockgletscher, Thufur (isländ: kleiner Aufeishügel) oder Frostmusterböden.

Bodenkriechen / Solifluktion

Die Solifluktion („Bodenkriechen" bzw. „Bodenfließen") ist ein flächig wirkender, wichtiger geomorphologischer Hangprozess. Solifluktion tritt in den österreichischen Alpen schon bei sehr schwach geneigten Hängen in der periglazialen bzw. subnivalen Höhenstufe auf. Da die Prozesse selbst nur sehr unzureichend beobachtet werden können, wird dies durch die zugehörigen Formen von Solifluktionszungen, -loben und -girlanden belegt (Veit und Höfner, 1993; Stingl et al., 2010).

Solifluktion findet als saisonaler Prozess besonders im Frühjahr und Frühsommer während der Schneeschmelze statt, wenn der noch gefrorene Untergrund oberflächig auftaut. Permafrost ist eine günstige Bedingung zur Ausbildung von Solifluktionsprozessen, jedoch keine Voraussetzung. Es wird generell zwischen Regelationsfließen/Frosttkriechen (engl.: frost creep) und Durchtränkungsfließen (engl.: gelifluction) unterschieden (French, 2007; Stingl et al., 2010). Beim Durchtränkungsfließen kann das freigesetzte Wasser nicht versickern und es kommt zu einer wassergesättigten breiartigen Sedimentmasse, die sich langsam hangabwärts verlagert. Auch die intensive Frostwirkung in der subnivalen Höhenstufe führt zu einem Bodenversatz durch das ständige Gefrieren und Wiederauftauen (Frostwechsel). Insgesamt werden durch diese Prozesse Bewegungsbeträge von wenigen Millimetern bis zu mehreren Dezimetern im Jahr erreicht (Jaesche et al., 2003). Das Ausmaß der Solifluktion hängt generell stark von der Beschaffenheit des Lockermaterials, dem Wasserangebot, der Frostintensität sowie dem Zeitpunkt und Verlauf des Auftauens des winterlichen Frostbodens ab. Eine der längsten Messreihen (seit 1985) zur Solifluktion in den Alpen stammt aus dem Gebiet der Glorer Hütte in den Hohen Tauern in Osttirol (Stingl et al., 2010). Diese Messreihe zeigt, dass Solifluktion in der frühsommerlichen Auftauphase stattfindet und in relativ kurzer Zeit (in Tagen bis wenigen Wochen) abläuft. Der

Vorgang vollzieht sich in erster Linie als Durchtränkungsfließen (über gefrorenem Untergrund), wogegen Frostkriechen/Regelationsfließen (Frostwechsel) nur einen geringen Beitrag zur Gesamtbewegung des Bodens liefert. Es zeigte sich ferner, dass die Variabilität der Solifluktion von Jahr zu Jahr auf klimatische Ursachen zurückzuführen ist. Jedoch besteht keine einfache Wechselbeziehung mit der Jahresmitteltemperatur oder dem Jahresniederschlag. Ausschlagend ist vielmehr die Frostbodentiefe, die wiederum stark vom Witterungsverlauf im Herbst (Temperaturverlauf, Schneedeckenbildung) sowie von der Mächtigkeit und Dauer der winterlichen Schneedecke abhängt (Jaesche et al., 2003). Besonders intensive Solifluktionsprozesse und ausgeprägte Solifluktionsformen in tieferen Höhenlagen können daher auch mit ehemaligem Permafrostbedingungen in Verbindung gebracht werden (Strunk, 1986).

Grabungen und kleinere Aufschlüsse an Solifluktionsloben zeigten an mehreren Standorten in den österreichischen Alpen einen stapelartigen Aufbau von Solifluktionsloben, die durch fossile Bodenhorizonte voneinander getrennt waren. Diese Wechsellagerung deutet auf aktive Solifluktionsphasen während kalter, eventuell auch schneereicher Phasen und warmer Perioden mit geringer Solifluktionsaktivität inklusive zunehmender Bodenbildung hin. Mit Hilfe von ^{14}C-Datierungen ist es gelungen, für das Holozän eine Abfolge dieser Solifluktions- und Bodenbildungsphasen abzuleiten (Veit, 2002).

Die zunehmende Erwärmung im Alpenraum hat unmittelbare Auswirkungen auf den Prozess der Solifluktion und wird nach bisherigen Erkenntnissen zu einer Abschwächung der Bewegungsbeträge führen (Stingl et al., 2010). Es besteht jedoch ein Forschungsdefizit in der Frage, wie die maßgeblichen Steuergrößen durch den Klimawandel beeinflusst und in welchen zeitlichen und räumlichen Dimensionen diese Veränderungen ablaufen werden. Solifluktionsbewegungen und die damit verbundene Hebungs- und Setzungserscheinungen können zudem Schäden an alpiner Infrastruktur (z. B. Wegen, Seilbahnstützen) verursachen. Periglazialgebiete, in denen mit Forstwechselprozessen zu rechnen ist, nehmen einen weitaus größeren Bereich des Hochgebirges ein als vergletscherte Gebiete. Quantitative Angaben über die potentiell betroffenen Flächen fehlen jedoch weitgehend. Die Erforschung dieses Prozesses im Kontext des Klimawandels ist daher auch von unmittelbarer gesellschaftlicher Relevanz.

Neue Technologien, empirische Messungen und Modellansätze, wie das terrestrische Laserscanning, die hochaufgelöste Datenerhebung relevanter Parameter oder die physikalisch-basierte Modellierung können dazu beitragen, die komplexen Wechselwirkungen der Solifluktion und klimatischer Steuergrößen besser zu verstehen (Otto und Schrott, 2010). Hochgenaue Bewegungsmessungen mittels Laserscanning ermöglichen zum Beispiel die großfläche Aufnahme von Hangbewegungen und Lobenbildung. Es fehlen jedoch umfassende Modellansätze, um Solifluktion auch großflächig zu simulieren. Die Solifluktion ist neben den Gletschern ein weiterer wertvoller Indikator für den Klimawandel im Alpenraum. Sie trägt zudem zur Sedimentproduktion im Gebirge bei und wirkt sich kleinräumig auf die Biodiversität aus.

Blockgletscher

Im Zentral- und Ostteil der österreichischen Alpen (ohne Nordtirol und Vorarlberg) gibt es 347 intakte Blockgletscher, welche in Summe eine Fläche von 21,3 km² bedecken. Die meisten dieser intakten Blockgletscher wurden in Osttirol (145) und Kärnten (126) kartiert, gefolgt von Salzburg (67). In der Steiermark fanden sich immerhin noch neun intakte Blockgletscher, wohingegen die Bundesländer Oberösterreich, Niederösterreich, Wien und Burgenland keine solchen intakten Formen aufweisen. Die mittlere Länge der intakten Blockgletscher beträgt 351 m, die Breite im Durchschnitt 222 m und im Mittel reichen sie bis 2 515 m herab (Kellerer-Pirklbauer et al., 2012a). In einer vergleichbaren Studie wurden alle Blockgletscher von Tirol inventarisiert, wobei alleine in diesem Bundesland 1 432 intakte Blockgletscher ausgewiesen wurden (Krainer und Ribis, 2012). Dies ist mit dem großflächigeren Vorhandensein von Permafrost und Blockgletscher begünstigenden Bedingungen in den Zentralalpen Tirols zu erklären (Ebohon und Schrott, 2008).

Als Permafrostformen sind intakte Blockgletscher von den klimatischen Rahmenbedingungen abhängig und werden daher in ihrer Dynamik vom Klimawandel beeinflusst. Als wichtigste steuernde Größen gelten die Strahlungs-, die Temperatur- und die Schneeverhältnisse (Kellerer-Pirklbauer und Kaufmann, 2012). Intakte Blockgletscher reagieren auf Veränderungen der Umweltbedingungen durch a) Zu- oder Abnahme des Schutt- und Eiseintrags in das Blockgletscher-System, b) Zu- oder Abnahme des im System gebundenen Eisgehaltes, c) Zu- oder Abnahme der Kriechbewegung, d) Veränderung des Temperaturregimes und e) Veränderung des Abflusses (Barsch, 1996; Haeberli et al., 2006).

Die längsten, im Kontext des Klimawandels relevanten Datenreihen sind zur Bewegungsdynamik verfügbar, wobei die diesbezüglichen Forschungsinitiativen in Österreich am Inneren Ölgruben-Blockgletscher, im Kaunertal und am Äußeren Hochebenkar bis in die 1920er Jahre zurückreichen (Finsterwalder, 1928). Pillewizer begann im Jahr 1938 am Hochebenkar-Blockgletscher mit Bewegungsmessungen und legte den

Box 4.2: Einer der schnellsten Blockgletscher in Österreich im Hinteren Langtalkar, Schobergruppe, Hohe Tauern

Box 4.2: One of the fastest moving rock glaciers in Austria in the Hinteren Langtalkar, Schober Mountain, Hohe Tauern Range

In den Bereichen der periglazialen Höhenstufe mit Permafrost sind aktive Blockgletscher eine markante Geländeform. Dabei handelt es sich um eisübersättigten Schuttmassen, die durch Deformation des im Schutt enthaltenen Eises sich kriechend hangabwärts bewegen. Die daraus resultierenden Formen weisen eine gewisse Ähnlichkeit zu Lavaströmen mit Quer- und Längswülsten auf. Innerhalb der intakten Blockgletscher kann zwischen aktiven (verbreiteter Permafrost und rezente Bewegung) sowie inaktiven (verbreiteter Permafrost jedoch ohne rezente Bewegung) unterschieden werden (Barsch, 1996). Intakte Blockgletscher entstehen, wenn a) eisübersättigter Permafrost, b) große Schuttmengen und c) Gelände mittlerer Neigung vorhanden sind. Dies ist in hoch gelegenen, gletscherfreien Karen der Fall, worin intakte Blockgletscher nicht nur typische Reliefelemente, sondern auch bedeutende Schutttransportmedien darstellen (Box 4.2 Abbildung 1).



Box 4.2 Abbildung 1 Der Blockgletscher im Hinteren Langtalkar, Schobergruppe, Hohe Tauern, ist einer der schnellsten Blockgletscher im gesamten Alpenraum mit mittleren Bewegungsraten im vorderen Bereich von über 2 m / Jahr (Delaloye et al., 2008). Der Blockgletscher bedeckt den gesamten Karbereich und weist für Blockgletscher typische Wulstformen auf. Aufgrund der hohen Bewegungsraten dieses Blockgletschers bildeten sich an diesem Blockgletscher in den letzten beiden Jahrzehnten Zerrspalten ähnliche Formen (Kaufmann und Ladstädter, 2010). Foto: Andreas Kellerer-Pirklbauer 23.08.2012

Box 4.2 Abbildung 1 The Hinteres Langtalkar Rock Glacier, Schober Mountains, Hohe Tauern Range, is one of the fastest movin g rock glaciers in the entire European Alps with mean surface velocities of 2 m / year (Delaloye et al., 2008). The rock glacier covers the entire cirque and is characterised by typical ridges and furrows. Crevasse-like openings formed during the last two decades because of high longitudinal strain (Kaufmann and Ladstädter, 2010). Photograph: Andreas Kellerer-Pirklbauer, 23.08.2012

Grundstein für die längste global verfügbare Bewegungsmessreihe auf Basis unterschiedlicher Messmethoden (Pillewizer, 1938, 1957; Vietoris 1958, 1972; Schneider und Schneider, 2001; Kaufmann und Ladstädter, 2002, 2003; Kaufmann, 2012). Ein weiteres Beispiel für Langzeitbeobachtung stellt der Dösener-Blockgletscher (Ankogelgruppe, Nationalpark Hohe Tauern) dar, für den seit 1954 aus photogrammetrischen und seit 1995 aus jährlichen geodätischen Messungen die zeitliche Variabilität der Oberflächenbewegung quantifiziert werden kann (Kaufmann et al., 2007). Abbildung 4.2. zeigt die Bewegungsentwicklung dieses Blockgletschers gemeinsam mit jenen vom Hinteren Langtalkar-Blockgletscher (hier jedoch nur der Mittelwert des oberen, langsameren Teiles) und des Weissenkar-Blockgletschers. Die Variabilität der Oberflächenbewegung zeigt mit einer Zeitverzögerung von etwa 2 bis 3 Jahren eine deutliche Korrelation mit der Lufttemperatur, indem die Blockgletscher-Bewegung sich in kühlen Perioden – wie etwa die Zeit der letzten markanten Gletschervorstöße in den

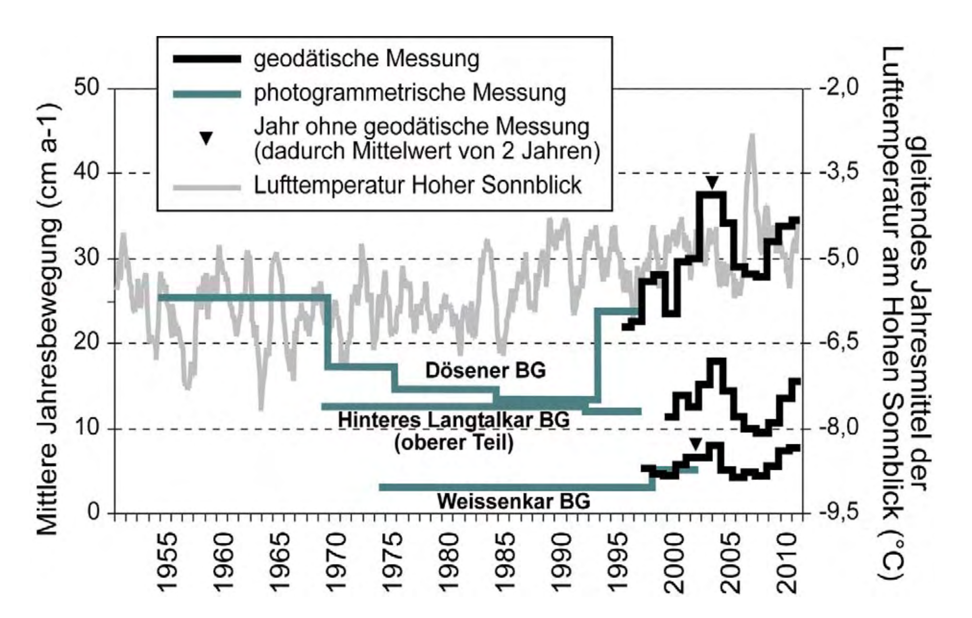


Abbildung 4.2 Mittlere Jahresbewegung am Dösener, Hinterem Langkar- (oberer Teil) und Weissenkar-Blockgletscher zwischen 1954 und 2011 auf Basis von geodätischen und photogrammetrischen Daten. Zum Vergleich dargestellt das gleitende Jahresmittel der Lufttemperatur am meteorologischen Observatorium Hoher Sonnblick seit 1950 Verändert nach: Kellerer-Pirklbauer und Kaufmann (2012)

Figure 4.2 Mean surface velocities of the three rock glaciers Hinteres Langtalkar, Dösen and Weissenkar during the period 1954 to 2011 based on geodetic and photogrammetric data. The running mean annual air temperature at the meteorological observatory Hoher Sonnblick is plotted additionally for comparison. Modified after Kellerer-Pirklbauer and Kaufmann (2012)

1970er und 1980er Jahren – verlangsamt, in wärmeren hingegen beschleunigt (Kellerer-Pirklbauer und Kaufmann, 2012).

Eine vergleichende Studie von 16 alpinen Blockgletschern in Frankreich, Schweiz und Österreich zeigte, dass im gesamten Alpenbogen Bewegungsveränderungen von Blockgletschern miteinander korrelieren (Delaloye et al., 2008), was den Klimaeinfluss auf Bewegungsveränderungen unterstreicht. Die Ursache hierfür ist neben der bei höheren Temperaturen vergrößerten Deformierbarkeit des Eises möglicherweise in der vergrößerten Verfügbarkeit von flüssigem Wasser im System zu suchen (Krainer und He, 2006; Lieb et al., 2012). Ungeachtet dieser kurzfristigen Variationen der Geschwindigkeit ist jedoch davon auszugehen, dass in der langen Zeitskala seit dem Höhepunkt der Würm-Kaltzeit (Last Glacial Maximum) die Blockgletscher-Aktivität jeweils an die kälteren Klimaphasen (Stadiale des Spätglazials, kältere Perioden des Holzäns) gebunden war.

Somit zeichnet sich als Reaktion von intakten Blockgletschern auf den aktuellen und zukünftigen Klimawandel – in Übereinstimmung mit Ergebnissen aus allen Teilen der Alpen – der folgende Ablauf als typisch ab: (a) der Temperaturanstieg führt gegenwärtig zu einer Erhöhung der Bewegung; (b) die gleichzeitige Vergrößerung der sommerlichen Auftauschicht verursacht hingegen das Absinken der Permafrost-Oberkante und damit eine Reduktion des Eisvolumens; (c) sinkt dieses unter einen (für jeden Blockgletscher individuellen) Schwellenwert, so kommt es zur Reduktion der Bewegung bzw. schließlich zu Stillstand (ein aktiver Blockgletscher wird inaktiv), was bei vielen intakten Blockgletschern in den kommenden Jahrzehnten erwartet werden kann (Kellerer-Pirklbauer et al., 2012); (d) das völlige Ausschmelzen des Eises durch Permafrost-Degradation wird wegen der Trägheit von Blockgletscher-Systemen möglicherweise aber wesentlich länger dauern. Aus diesen geschilderten Veränderungen sind nur in Ausnahmefällen Folgeprozesse zu erwarten, die wesentliche negative Auswirkungen auf andere Elemente hochalpiner Mensch-Umwelt-Systeme (z. B. Naturgefahrenpotenzial, Hydrogeologie) haben werden.

Permafrost

Die Erforschung des Permafrostes im Hochgebirge ist ein vergleichsweise junger Forschungszweig, der im Alpenraum systematisch erst seit den 1970er Jahren betrieben wird (Haeberli et al., 2010; Krainer et al., 2012). Durch die zunehmende Medienberichte zu den Folgen des Klima- und Umweltwandels wird das Thema Permafrost in den letzten Jahren verstärkt in der Öffentlichkeit wahrgenommen. Das vermehrte Auftreten von Felsstürzen in überdurchschnittlich warmen Sommern (z. B. 2003 und 2005) sowie die Beeinträchtigung von hochalpinen Wanderwegen und Bauwerken machen Veränderungen im Zusammenhang mit dem Klimawandel und dem unsichtbaren Phänomen Permafrost bemerkbar; direkte und indirekte Auswirkungen auf die Nutzung des Hochgebirgsraum sind die Folge (Gruber and Haeberli, 2007, Kern et al., 2012).

Da es sich bei Permafrost um ein rein thermisches Phänomen handelt – Lithosphärenmaterial (Boden, Schutt, Fels), das mindestens über zwei aufeinander folgende Jahre Temperaturen von ≤ 0 °C aufweist (French, 2007) – kann die räumliche Verbreitung nur indirekt über Geländeindikatoren (Blockgletscher, perennierende Schneeflecken, protalus ramparts) und Modelle abgeleitet werden (Schrott et al., 2012a).

In Österreich muss ab etwa 2500 m Seehöhe mit dem Auftreten von Permafrost gerechnet werden (Tabelle 4.1); das entspricht rund 2 % der Staatsfläche (1600 km²) (Ebohon und Schrott, 2008). In den hochgelegen Alpenregionen – wie den Hohen Tauern – unterliegen rund 25 % dem Einfluss des Permafrostes (Schrott et al., 2012a). Je nach Höhenlage, Exposition, Schneeverhältnissen und Untergrundbeschaffenheit variiert die Untergrenze des Permafrosts in den Hohe Tauern um wenige Meter bis zu mehreren hundert Metern (Otto et al., 2012).

Für dieses Kerngebiet der österreichischen Alpen steht seit 2012 eine detaillierte Permafrostkarte zur Verfügung (Schrott et al., 2012a). Sie dient als Hinweiskarte zur Abschätzung des gegenwärtigen Permafrostvorkommens im regionalen Maßstab (Abbildung 4.3). Die Karte liefert UmweltplanerInnen nützliche Dienste im Sinne einer Einschätzung von alpinen Gefahren und Risiken und ist eine Entscheidungshilfe bei der Interpretation von Landschaftsveränderungen. Alpine Naturgefahren (Felsstürze, Muren etc.), die sich durch Veränderungen im Permafrost ergeben, sind meist eine Folge von Schmelzprozessen in eishaltigen Sedimentkörpern oder Felswänden. Bauwerke werden in der Folge durch Setzungserscheinungen oder durch Massenbewegungen wie Hangrutschungen, Muren oder Steinschlag beschädigt und die Funktion von Anlagen (z.B. Seilbahnstützen, Lawinenschutzzäune) auf abwärts kriechenden Permafrostkörpern kann stark beeinträchtigt werden. Steinschlag- und Felssturzprozesse sind bereits heute eine zunehmende Gefährdung für Straßen, Wanderwege, Kletterrouten, Schipisten und Seilbahnen (Krainer, 2007). Gefahren können aber auch schon durch eine Erwärmung des Permafrostes hervorgerufen werden, da die Festigkeitseigenschaften schon bei Temperaturen um –1,5 °C abnehmen (Davies et al., 2001). Während die Verbreitung der Permafrostbereiche in Österreich grob abgeschätzt werden kann, sind die thermischen Eigenschaften und die zukünftige Entwicklung des Phänomens noch weitgehend unbekannt. Hierzu sind langfristige Untersuchungen z.B. durch Temperaturmonitoring in Bohrlöchern notwendig, wie sie bereits am Kitzsteinhorn durch die Uni Salzburg und am Hohen Sonnblick durch die ZAMG durchgeführt werden (Hartmeyer et al., 2012b; Schöner et al., 2012).

Um abschätzen zu können, wie sich der Klimawandel in den Alpen auf die gegenwärtige Permafrostausdehnung auswirkt, können Szenarien herangezogen werden, die einen möglichen Temperaturanstieg und eine Erwärmung der Permafrosttemperatur bzw. ein Auftauen des Permafrostes simulieren. Basierend auf den aktuell verfügbaren, langjährigen Messreihen ausgewählter Klimastationen in den Hohen Tauern wurden Temperaturgradienten zwischen Berg- und Talstationen berechnet. Für die Hohen Tauern ergibt sich ein adiabatischer – also ohne Austausch von Energie vonstattengehender – Temperaturgradient von ca. –0,51 °C / 100 m (ZAMG, 2013). Bei einer zukünftigen Temperaturerhöhung um +1 K und unter der stark vereinfachten Annahme einer linearen Beziehung zwischen der Permafrostverbreitung und der Lufttemperatur, würden die Permafrostuntergrenzen um ca. 200 m ansteigen (Schrott et al., 2012b).

Schon ein partielles Auftauen oder eine Erwärmung der Permafrosttemperatur kann zu einer Intensivierung gravitati-

Tabelle 4.1 Potenzielle Permafrostvorkommen Österreichs in Bezug auf die Gesamtfläche und differenziert nach Bundesländern. Die Angaben entstammen Ebohon und Schrott (2008) und basieren auf einem topoklimatischen Schlüssel mit dessen Hilfe die Permafrostuntergrenzen modelliert werden

Table 4.1 Potential permafrost distribution (portion of surface area) in the states of Austria. Data according to the modeling approach of Ebohon und Schrott (2008) which is based on a topoclimatic key

	Permafrostfläche (%)	Permafrost möglich (%)	Permafrost wahrscheinlich (%)
Burgenland	0,00	0,00	0,00
Kärnten	1,65	0,87	0,78
Niederösterreich	0,00	0,00	0,00
Oberösterreich	0,04	0,03	0,01
Salzburg	2,76	1,48	1,28
Steiermark	0,05	0,05	0,00
Tirol	9,82	3,84	5,44
Vorarlberg	1,90	1,28	0,61
Wien	0,00	0,00	0,00
Österreich	1,90	0,86	1,04

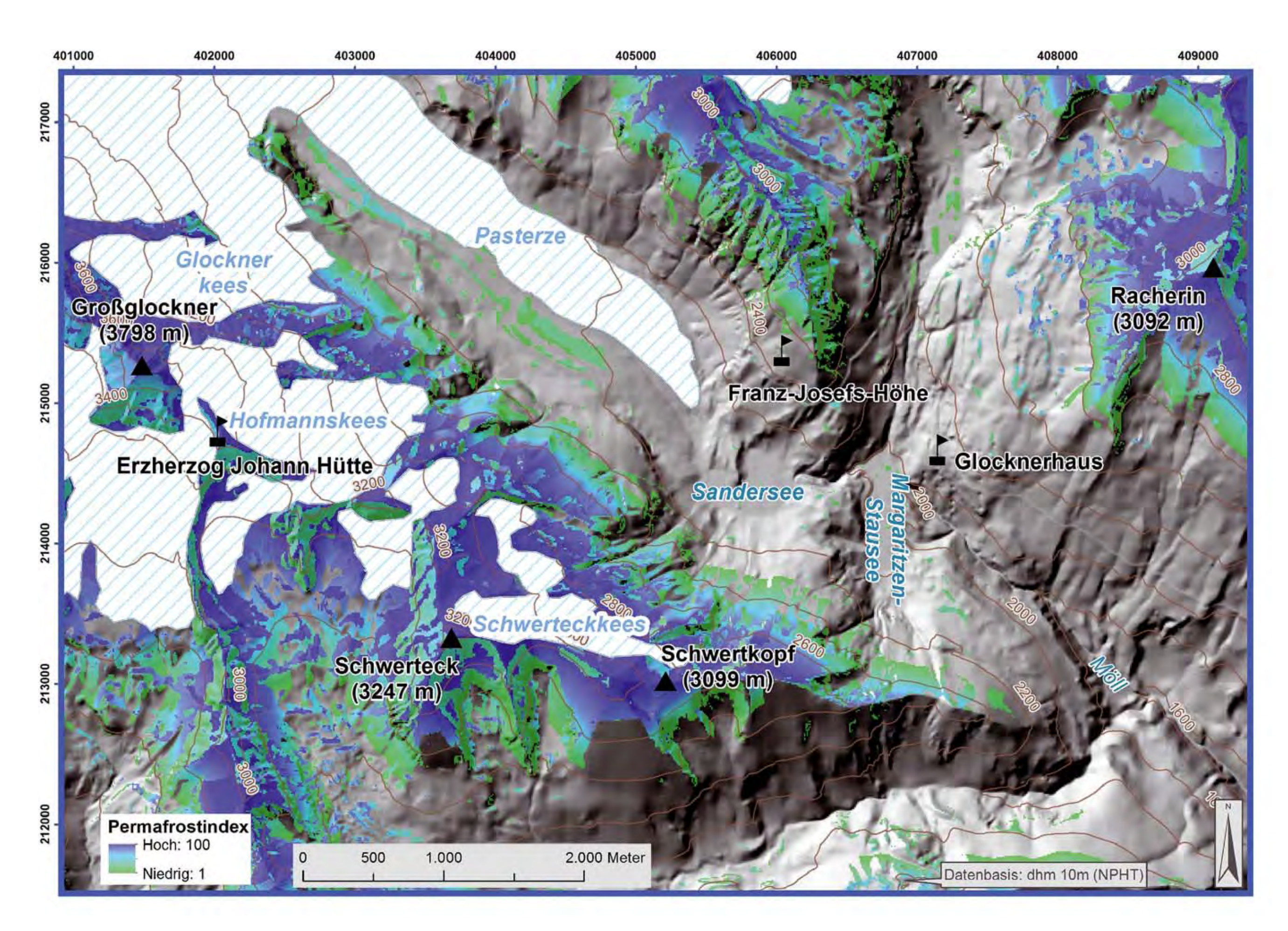


Abbildung 4.3 Modellierung der Permafrostverbreitung im Bereich des Großglockners. Aus: Schrott et al. (2012a)
Figure 4.3 Modelling of permafrost distribution in the surrounding of the Großglockner area. Based on: Schrott et al. (2012a)

ver Prozesse führen. Untersuchungen von Harris et al. (2009) zeigen, dass die felsmechanische Scherfestigkeit schon bei Temperaturen um –1,5 °C abnimmt und somit die Felsinstabilität nachhaltig beeinträchtigt wird. In Sedimentkörpern kann schon eine Zunahme der Auftauschicht (partielles Auftauen des Permafrostes) zu vermehrten Murgängen und Rutschungen führen, da vermehrt mobilisierbares Lockermaterial zur Verfügung steht (vgl. Abschnitt 4.2.1). Die komplexen Zusammenhänge sind jedoch bislang nur teilweise geklärt und es liegen nur vereinzelt detaillierte Untersuchungen aus dem Alpenraum vor (Hirschmugl, 2003; Sattler et al., 2011).

Um die Auswirkungen des Klimawandels auf die Permafrostgebiete besser abschätzen zu können, sind Langzeituntersuchungen der Permafrosttemperatur erforderlich. Im Rahmen des Projektes MOREXPERT („Developing a Monitoring Expert System for Hazardous Rock Walls") wird am Kitzsteinhorn (3 203 m), basierend auf einer Kombination von Bohrlochmessungen im Fels, geophysikalischen Untersuchungen und meteorologischen Aufzeichnungen, ein Langzeitmonitoring realisiert (Hartmeyer et al., 2012a). Die fünf temperaturbestückten Bohrlöcher im Festgestein mit Tiefen zwischen 20 und 30 m liefern neben geoelektrischem Monitoring und zahlreichen oberflächennahen Felstemperaturen (1 m) ab 2012 auch wertvolle Daten zur Temperatur des Permafrosts im Fels und damit zur zukünftigen Entwicklung des Permafrostes.

4.2.4 Glaziale Prozesse

Große Areale der österreichischen Alpen und ihrer Vorländer sind durch glaziale (und glazifluviale) Prozesse geformt worden. Moränenlandschaften, Trogtäler und Zungenbeckenseen sind Ausdruck des Wechsels zwischen Glazial- und Interglazialzeiten (Zeitskala von 10^4 bis 10^5 Jahren) bzw. von Schwankungen innerhalb der Eiszeiten (Zeitskala 1 000 Jahre). Die Folgen des aktuellen Klimawandels in der Zeitskala von Jahrzehnten bis Jahrhunderten müssen unabhängig von diesen großräumigen Prozessen im Vergleich mit den Klima- und Gletscherschwankungen des Holozäns betrachtet und

Box 4.3: Permafrostmodellierung
Box 4.3: Modelling of permafrost

Das empirische Modell PERMAKART 3.0 modelliert die Wahrscheinlichkeit für Permafrostauftreten in den Hohen Tauern. Das Kernelement des Modells PERMAKART 3.0 ist ein topoklimatischer Schlüssel, der bei acht Expositions- und drei verschiedenen Hangneigungsklassen (steiler Fels, Hänge, Hangfußflächen) in den jeweiligen Höhenstufen die gegenwärtigen Untergrenzen der Permafrostverbreitung ausweist. Mit Hilfe eines digitales Geländemodell in hoher Auflösung (10 m Raster) berechnet das Modell die Auftretenswahrscheinlichkeit und visualisiert das Ergebnis anhand eines Index von 1–100 (Schrott et al., 2012a). Die Ergebnisse der Modellierung sind mit über 600 Messungen zur Basistemperatur der winterlichen Schneedecke (BTS) validiert worden und zeigen eine gute Übereinstimmung (Schrott et al., 2012b).

quantifiziert werden. Durch den Gletscherrückgang werden große Flächen freigegeben die aufgrund der erst langsam aufkommenden Vegetation und der meteorologischen Bedingungen durch eine intensive Verwitterung gekennzeichnet sind. Eine direkte Folge der Gletschererosion ist insbesondere der hohe Feinsedimenteintrag (Gletschermilch) in Fließgewässer und Seen, ein typisches Charakteristikum glazial geprägter Abflussregime. Eindrucksvoll zeigen sich die Folgen der Sedimentbildung und des Sedimenttransportes bei hochalpinen Speicherseen in glazial geprägten Einzugsgebieten. Der Margaritzenstausee in den Hohen Tauern (Großglockner) ist ein gut untersuchtes Beispiel für die Verlandungsproblematik von Stauseen (Knoblauch et al., 2006). Hartmeyer et al. (2007) haben für die ca. 18 km² große Pasterze für das Jahr 2006 eine Schwebstofffracht von 50 000 t durch die Gletschererosion berechnet. Neben den künstlichen Seen bilden auch natürliche Seen Sedimentfallen für die in den Fließgewässern transportierten Sedimente und können bei entsprechendem Sedimentnachschub auch verlanden (z. B. Sandersee bei der Pasterze).

Während die Sedimentbildung eindeutig beobachtbar und messbar ist, kann der Zusammenhang zu Veränderungen des Klimas nicht einfach hergestellt werden. Die Gletschererosion temperierter Gletscher hängt nicht nur mit Eigenschaften des Gletschers, (Bewegung, Wasserführung) sondern auch mit den topographischen Gegebenheiten des Gletscherbetts (Neigung, Neigungsänderungen, Konkavität / Konvexität des Gletscheruntergrundes) und der Geologie (Gesteinsart) zusammen. Allgemein kann man davon ausgehen, dass durch die Temperaturzunahme die Gletscher negative Massenbilanzen aufweisen und die Abflussbildung verstärkt wird (insbesondere bei großer Abweichung vom Gleichgewichtszustand), während die Gletscherbewegung sich auf Grund der abnehmenden Eismasse verlangsamt. Sowohl Gletscherbewegung als auch die glaziale Wasserführung beeinflussen Sedimentbildung und Sedimenttransport. Zusätzlich können unterirdische Senkenbereiche an der Gletscherbasis Sediment-Zwischenspeicher bilden, die auch dann vermehrt Sedimente freigeben, wenn Gletscherbewegung und Erosionswirkung allgemein abnehmen. Solange Gletscher noch existieren, ist das subglaziale Abflussregime zeitlich schnellen Änderungen unterworfen und die Sedimentfracht daher schwer modellierbar. Erst bei einem vollständigen Verschwinden der Gletscher kann von einer eindeutigen Abnahme des Feinsedimentbeitrages in den alpinen glazial beeinflussten Fließgewässern ausgegangen werden.

4.2.5 Waldbrände

Waldbrände sind in Österreich eine bislang relativ wenig beachtete Naturgefahr. Verglichen mit Mediterrangebieten, Savannen oder borealen Wäldern sind die Wälder des Alpenraums als ein nur gering feueranfälliges Ökosystem einzustufen. Im ganzjährig humiden Österreich spielt Feuer für den Wald verglichen mit Windwurf und Schädlingsbefall nur eine geringe Rolle. Laut der Datensammlung zum österreichischen Waldschadensbericht kam es z. B. im Jahr 2011 zu einem Schaden von über 79 272 ha durch Sturm und 40 284 ha durch Muren und Lawinen, aber nur 44 ha durch Waldbrand. Zum Vergleich: In Italien wurde in 2010 die ca. 1 000-fache Fläche (46 537 ha) durch Waldbrand geschädigt (Schmuck et al., 2011). Die Bekämpfung kann in ganz Österreich dank einer funktionierenden Feuerwehrorganisation frühzeitig und effektiv erfolgen, was neben der geringen klimatischen Disposition zu einer recht geringen Größe der beeinträchtigen Areale führt. Große Brandflächen sind momentan fast ausschließlich aus der Zeit von vor 1950 bekannt (Sass et al., 2012).

Die aktuelle Erwärmung könnte jedoch die Feueranfälligkeit erheblich steigern. Die trockenen Sommer der Jahre 2003 und 2007 haben deutlich gezeigt, dass Waldbrände unter den entsprechenden Witterungsbedingungen rasch entstehen können und erhebliche Ausmaße annehmen können (Gossow et al., 2009; Vacik et al., 2011). Eine erhöhte Feuerfrequenz stellt insbesondere für den alpinen Raum ein Risiko dar, da die Regenerationszeiten der Vegetation nach Feuerschäden relativ

hoch sind (z. B. Wohlgemuth et al., 2005). Die Auswirkungen solcher Feuer sind daher oft noch nach Jahrzehnten im Landschaftsbild zu sehen. Eine vollständige Entwaldung nach einem Waldbrand führt durch die fehlende Schutzfunktion des Waldes zu einem erheblich erhöhten Potenzial für sekundäre Naturgefahren.

Statistische Daten zur Waldbrandfrequenz sind inhomogen und unvollständig. Waldbranddaten für ganz Europa werden im Europäischen Waldbrand-Informationssystem (EFFIS) gesammelt; Daten aus Österreich werden jedoch erst seit 2006 planmäßig erfasst und in diese Datenbank eingespeist. Eine noch unpublizierte Datenbank der BOKU und der KFU-Graz enthält zur Zeit ca. 1 200 Brandereignisse, welche bis ins 19. Jahrhundert zurückreichen; der überwiegende Schwerpunkt liegt jedoch auch hier auf dem Zeitraum von 2003 bis heute. Eine Analyse des mittelfristigen Effekts der aktuellen Klimaänderung auf die Feuerfrequenz lässt sich aufgrund dieser Inhomogenität nur schwer durchführen.

Am stärksten betroffen sind momentan die Bundesländer Niederösterreich, Kärnten und Tirol (Gossow et al., 2009). Wichtige räumliche Steuerfaktoren für Waldbrände sind waldbaulicher, topographischer und sozioökonomischer Art. Nach Erkenntnissen des seit 2011 laufenden FIRIA-Projekts (Sass et al., 2012) sind im Vergleich zur gesamten Waldfläche die Waldbrände insbesondere in den häufigen Fichten- und den Fichten-Föhren-Beständen leicht überrepräsentiert. Südexponierte Hänge weisen ein um fast 100 % erhöhtes Waldbrandrisiko auf, was vermutlich auf das wärmere und trockenere Mikroklima sowie die dadurch früher eingeleitete Schneeschmelze und die damit freigelegte abgestorbene Biomasse zurückzuführen ist. Bei der Hangneigung zeigt sich ein Maximum der Branddichte bei ca. 35°. Unterhalb davon etwa bei 25° sind die Ausbreitungsbedingungen für Feuer vermutlich ungünstiger, oberhalb davon etwa bei 50° nimmt hingegen die Nutzungsdichte deutlich ab (Sass et al., 2012). Die Auslöser von Waldbränden in Österreich sind zu ca. 10 % Blitzschläge, zu ca. 90 % sind die Ursachen anthropogen (Unachtsamkeit, Brandstiftung, Eisenbahnfeuer usw.; vgl. Sass et al., 2012). Daher ist es nicht überraschend, dass die Entfernung zu Siedlungsräumen und Infrastruktur deutlich mit der Feuerfrequenz korreliert und die vorher genannten Abhängigkeiten häufig überdeckt werden. Multivariate Korrelationsanalysen zeigen, dass in Tirol die bedeutendsten räumlichen Steuerfaktoren die Bevölkerungsdichte und das Mesoklima (Anzahl von Tagen über Schwellenwerten bestimmter Feuerwetterindizes) sind (Arpaci et al., 2014).

Entgegen des bisweilen aus Medienberichten entstehenden Eindrucks sind laut der EFFIS-Datenbank in ganz Europa die Feuerzahlen ebenso wie die geschädigten Flächen rückläufig (Schmuck et al., 2011). Ein klimatisch bedingter Anstieg wird vermutlich durch den gegenläufigen Effekt einer verbesserten Brandbekämpfung kompensiert. Auch für Österreich kann, bei allgemein unklarem Trend, eine abnehmende Anzahl und Fläche von Waldbränden bei etwa gleichbleibender mittlerer Feuergröße konstatiert werden. In den letzten Jahrzehnten besteht die Tendenz zur Verschiebung der Feuersaison vom Frühjahr in den Sommer bei einem gleichzeitigen Anstieg des Prozentanteils von Blitzschlagfeuern (Vacik et al., 2011). Die überdurchschnittlich stark blitzschlaggefährdete Fichte (z. B. Pezzatti et al. 2009) könnte sich hier als besonders anfällig erweisen.

Zwar sind und waren die Brandauslöser in Österreich ganz überwiegend anthropogen, aber das Klima wirkt dennoch stark modifizierend auf die Brandhäufigkeit. Ein Maximum von Waldbränden konnte in den 1940er Jahren festgestellt werden (Sass et al., 2012), was auf eine Superposition von trockenen Sommern und intensiver anthropogener Aktivität (z. B. Wilderei, Schmuggel) zurückzuführen ist. Für das letzte Jahrzehnt ist die Datenbasis deutlich homogener; hier konnte ein starker Anstieg der Waldbrandhäufigkeit im „Jahrhundertsommer“ 2003 und im ebenfalls trockenen Sommer 2007 festgestellt werden (Vacik et al., 2011 und Abbildung 4.4). Aufgrund der aktuellen Erwärmungstendenz und der steigenden Wahrscheinlichkeit trockener Witterungsabschnitte im Sommer wird daher in Zukunft eine größere Häufigkeit und Schwere von Waldbränden für den Alpenraum erwartet. Außerdem könnten Sturmschäden und möglicherweise häufigere Schädlingsbefälle die Vulnerabilität gegenüber Feuer erhöhen, da der Brennstoffvorrat durch solche Ereignisse stark ansteigt.

Auch wenn die von Feuer betroffenen Waldflächen momentan nur klein sind, ist zu beachten, dass auf ungünstigen, ökologisch nicht an Feuer angepassten Standorten die Regeneration sehr langwierig sein kann. Die Regeneration von alpinen Waldbrandflächen wurde an den schweizerischen Waldbrandflächen von Müstair und Leuk systematisch untersucht (Wohlgemuth et al., 2005; Wasem et al., 2010), aus Österreich liegen Untersuchungen aus den Tiroler Kalkalpen vor (Sass et al., 2012). Offenbar ist die Gefahr langfristiger Degradation auf Kalkstein besonders groß, da hier Böden mit hohem organischem Anteil durch den Brand komplett zerstört werden können. Auf den dann weitgehend kahlen Flächen ist die Frequenz und Intensität geomorphologischer Prozesse extrem verstärkt. Wegen der mechanischen Schäden durch Lawinen und Steinschlag ist die Erholung der Vegetation oft schwierig, so dass die Regeneration in ungünstigen Lagen Jahrzehnte oder sogar Jahrhunderte in Anspruch nehmen kann (Sass et al., 2012).

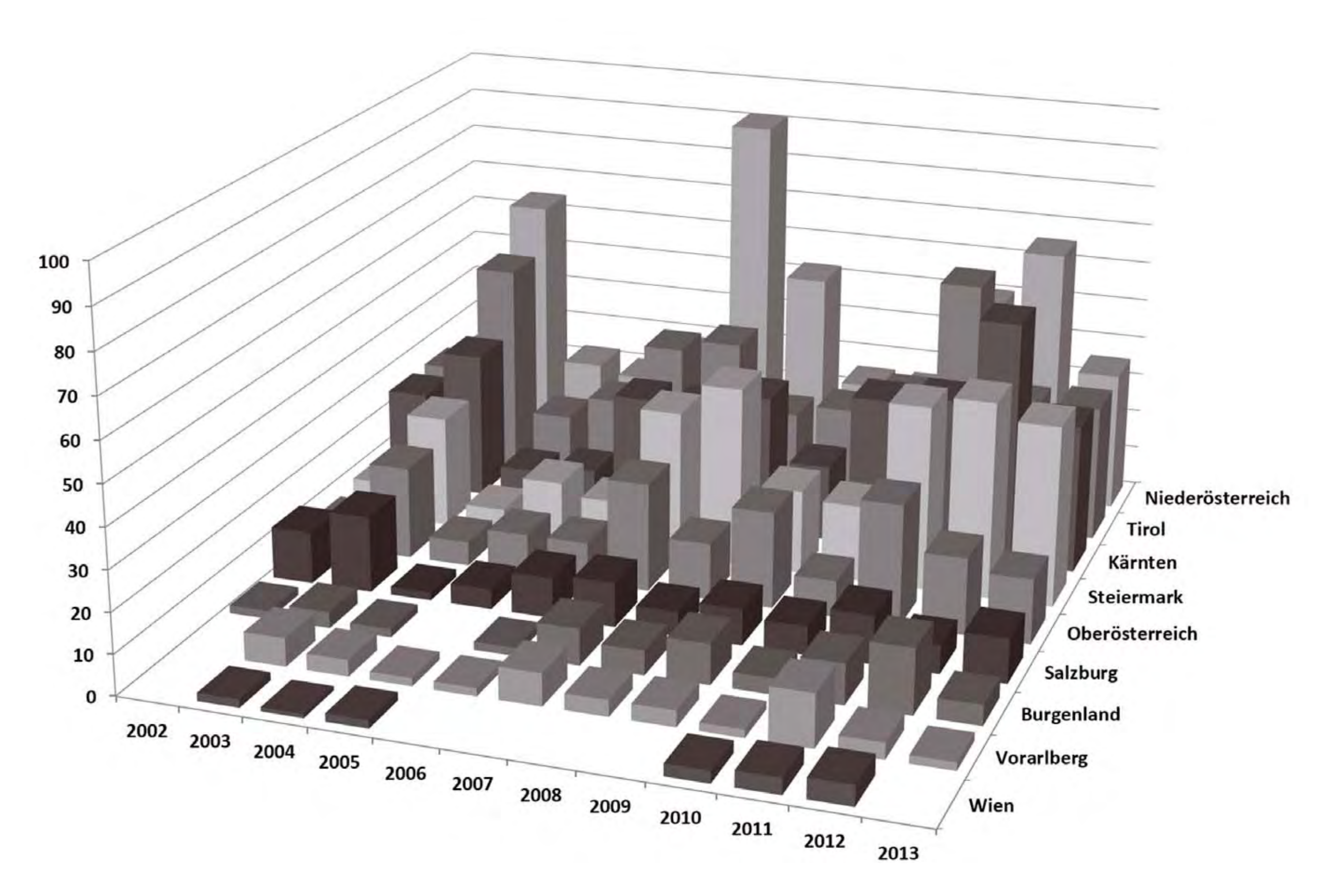


Abbildung 4.4 Waldbrandhäufigkeit in den Jahren 2002 bis 2013 in den Bundesländern Österreichs (Vacik et al., 2011, verändert und ergänzt)
Figure 4.4 Forest fire frequency in the years 2002 to 2013 in the federal countries of Austria (Vacik et al., 2011, modified and supplemented)

Aufgrund der kleinen betroffenen Flächen und der allgemein sehr gut organisierten Feuerbekämpfung ist der mögliche direkte Schaden für den Menschen als relativ gering einzustufen. Die entscheidende Besonderheit im Gebirgsland Österreich ist jedoch die Schutzfunktion des Waldes gegenüber Lawinen, Steinschlag und Hochwasser. An steilen Hängen wird die Schutzfunktion des Waldes durch schwere Brände erheblich reduziert, was zu einer erhöhten Wahrscheinlichkeit von sekundären Naturgefahren führen kann. Die bedeutendsten Folgeereignisse sind erhöhter Abfluss und Bodenerosion und Murgangaktivität (Shakesby und Doerr, 2006) und Lawinentätigkeit (Sass et al., 2010). Diese Prozesse haben wiederum eine negative Rückkopplung auf die Wiederbesiedlung.

Es bestehen noch erhebliche Wissenslücken hinsichtlich der besonders betroffenen Waldgesellschaften, der Regenerationszeit nach schweren Bränden und des Wechselspiels zwischen klimatischer Disposition und anthropogener Auslösung. Zusammenfassend lässt sich jedoch aufgrund der erwähnten „Feuersommer" 2003 und 2007 vermuten, dass die Disposition für Waldbrände mit einer größeren Häufigkeit sommerlicher Trockenperioden weiter zunehmen wird, auch wenn die tatsächliche Brandhäufigkeit und Brandfläche durch bessere Aufklärung, Frühwarnung und Brandbekämpfung möglicherweise weiter sinken wird. Aufgrund der möglichen, gravierend negativen Folgen für die Schutzfunktion des Waldes sind weitere Forschungsaktivitäten und frühzeitliche waldbauliche Gegenmaßnahmen notwendig.

4.2.6 Weitere Sedimenttransporte

Fluviale Prozesse

Der Transport von Feststoffen (Sedimenttransport) in wasserführenden Gerinnen erfolgt als Geschiebe oder als Schwebstoff. Da Österreich ein Gebirgsland ist, kommt Gebirgsbächen und -flüssen gegenüber großen Flusssystemen des Tieflands erhöhte Bedeutung zu; der vorherrschende Transportprozess in diesen ist der Geschiebetransport. Dieser ist definiert als Verlagerung von Gesteinskörnen im Gerinne, die auf oder nahe der Gewässersohle gleitend, rollend oder springend fortbewegt werden (ÖN B 2400).

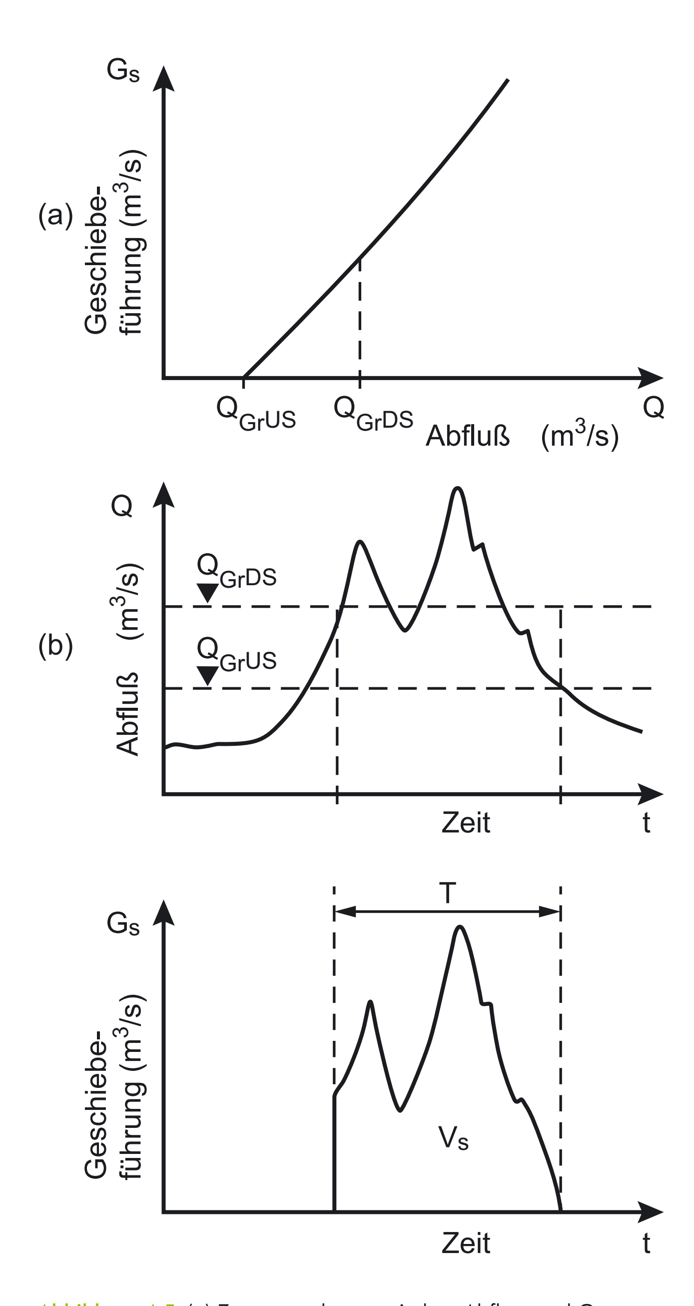


Abbildung 4.5 (a) Zusammenhang zwischen Abfluss und Geschiebeführung bzw. (b) zwischen Abfluss- und Geschiebeganglinie (Vischer und Huber, 1993). Bei der Grenzschleppspannung (GrDS) gerät das Geschiebe in Bewegung. Sie ist ca. 30 % größer als die Sedimentationsschleppspannung (GrUS) bei welcher die Ablagerung beginnt

Figure 4.5 (a) Relationship between runoff and sediment transport respectively (b) between runoff and sediment transport hydrograph (Vischer und Huber, 1993). Reaching the critical tractive force (GrDS) the sediment movement starts. It is about 30 % greater than the critical tractive force (GrUS) where deposition starts.

Die Materialmenge, die durch das abfließende Wasser mobilisiert und transportiert werden kann, hängt einerseits von der Transportkapazität des Gerinnes und andererseits vom Widerstand, den das Material seinen Abtransport entgegensetzt (Materialverfügbarkeit – Materialeigenschaften), ab. Besonders in den Gebirgsbächen (Wildbächen) können große Geschiebemengen in kurzer Zeit transportiert werden, während in den größeren Flusssystemen über längere Zeiträume große Feststoffmengen verlagert werden.

Die Transportkapazität wird von der abfließenden Wassermenge und der Strömungsgeschwindigkeit bestimmt. Der Abfluss wiederum beeinflusst auch die Strömungsgeschwindigkeit und das Gerinnequerprofil (zu diesem Zusammenhang vgl. z. B. Fließformel nach Gauckler-Manning-Strickler). Er ist generell von den Witterungsverhältnissen und speziell von der Entwicklung der extremen Niederschlagsereignisse abhängig. Dadurch besteht ein Einfluss des Klimawandels auf den Geschiebetransport in Gerinnen.

Damit Material tatsächlich mobilisiert und transportiert werden kann, ist ein kritischer Abfluss nötig, welcher als untere Grenze für den Materialtransport gilt (z. B. Bestimmung nach Meyer-Peter in Sendzik, 2003) Über diesem Grenzwert steigt die Menge des transportierten Geschiebes (in ungestörten Regimen und bei höheren Gerinneneigungen) überproportional zur Abflussmenge (Abbildung 4.5 a und 4.5 b). Die künftige Entwicklung extremer Niederschlagsereignisse und die damit verbundene Magnitude von Spitzenabflüssen ist dadurch relevant, während z. B. sinkende Mittel- und Niederwasserstände auf den Geschiebetransport keinen nennenswerten Einfluss haben werden (Abbildung 4.5; Vischer und Huber, 1993; Habersack et al., 2009).

Im Alpenraum wird von einer Änderung in den Abflussregimen ausgegangen, die saisonal, regional und bezogen auf die Einzugsgebietscharakteristik differenziert zu betrachten ist (vgl. Band 2, Kapitel 2; Fürst et al., 2010; Mauser und Prasch, 2010; Nachtnebel und Stanzel, 2010; Climchalp, 2008; Schädler et al., 2007). Für Österreich werden Änderungen der Abflüsse bei Hochwässern im Bereich von –4 % bis +10 % erwartet (Blöschl et al., 2011). Die Unsicherheiten sind aber speziell in den kleinen Einzugsgebieten von Gebirgsbächen sehr groß, in denen Geschiebetransportprozesse eine große Rolle spielen und die sehr sensibel auf Änderungen reagieren (Blöschl et al., 2011).

Der zweite wesentliche Faktor der die Geschiebeführung bestimmt, ist die Materialverfügbarkeit. Der Klimawandel kann lokal zu einer deutlichen Erhöhung des Geschiebepotenzials (z. B. in Gletscherrückzugsgebieten oder durch das Auftauen von Permafrostbereichen) und damit der Feststofftransportraten führen. Diese Auswirkungen werden allerdings auf Gerinne und steile Bachläufe des Gebirgsraums begrenzt sein (Blöschl et al., 2011; Raymond-Pralong et al., 2011; Schleiss et al., 2010; Schädler, 2010). Intensivere Niederschlagsereignisse können zu einem vermehrten Auftreten von Rutschun-

gen (Tilch et al., 2011) und dadurch ebenfalls zu lokal erhöhten Geschiebepotenzialen führen. In diesen Bereichen kann es in steilen Gerinnen durch einen Prozesswechsel (z. B. von fluvialen Geschiebetransport hin zu murartigen Abflüssen) zu überproportionalen Auswirkungen kommen (Vervielfachung der maximalen Abflussmenge; Andrecs et al., 2010). In den flacheren Gerinnen und Flussläufen größerer Einzugsgebiete sind solche Auswirkungen nicht zu erwarten, die mögliche Zunahme des Geschiebetriebs sollte hier unter den natürlichen Schwankungen liegen (Blöschl et al., 2011).

Neben der natürlichen Steuerung wird der Geschiebetransport vor allem von anthropogenen Aktivitäten bestimmt. Verschiedene Landnutzungstypen haben unterschiedlichen Einfluss auf das Abflussregime (Markart et al., 2012) und damit auch auf den Feststofftransport (Habersack et al., 2009; BAW, 2007). Die Effekte der Klimaänderungen (insbesondere veränderte Niederschlagsintensitäten) können durch Landnutzungsarten, die zu hohen Oberflächenabflüssen führen (wie z. B. Bodenversiegelung), verstärkt werden.

In den steilen Oberläufen der Gebirgsbäche begrenzen Schutzbauten oft den Geschiebetransport. Eine lokal erhöhte Geschiebeverfügbarkeit und eventuell erhöhte Niederschlagsintensitäten können in diesen Bereichen zu verstärkter Beanspruchung der Bauwerke führen (Andrecs et al., 2010; Schädler, 2010). Entsprechende Untersuchungen sind allerdings noch mit großen Unsicherheiten verbunden.

Die Geschiebetransportsysteme in Flussläufen werden in weiten Bereichen durch Flussregulierungen und Kraftwerksbauten bestimmt. Durch Flussregulierungen sind natürliche Retentionsräume verloren gegangen: die Gerinnerauigkeit wurde verringert und das Gefälle (durch Begradigungen) erhöht. Die damit erzielte Erhöhung der Abflusskapazitäten durch höhere Fließgeschwindigkeiten (im Hochwasserfall) führt gleichzeitig zu einer Erhöhung der Transportkapazitäten. Demgegenüber unterbrechen Kraftwerke den Feststofftransport (Habersack et al., 2011). In den Staubereichen kommt es aufgrund verringerter Fließgeschwindigkeiten zur Ablagerung des Geschiebes, das in der Folge fehlt. Dadurch treten unterhalb von Kraftwerken trotz der regulierten Abflüsse häufig Erosionsprozesse (Gerinneeintiefungen) auf. Die Intensität dieser Prozesse hängt direkt von der Entwicklung der Abflüsse (insbesondere Hochwasser-Frequenz und -Magnitude) und damit von der Entwicklung des Klimas ab. (z. B. Raymond-Pralong et al., 2011; Blöschl et al., 2011).

Abschließend ist festzuhalten, dass Aussagen zur Entwicklung des Niederschlags im Zuge der Klimaänderung unsicher sind und die Veränderungen der zukünftigen Niederschlagsverhältnisse zwischen den einzelnen RCM's (Regionalen Klimamodellen) stark variieren (Kling, 2011; siehe auch Band 1, Kapitel 4). Eine verlässliche Prognose der Entwicklung extremer Niederschlagsereignisse (insbesondere von konvektiven Niederschlagsereignissen; vgl. Schöner et al., 2011; Böhm, 2008), der daraus resultierenden Abflussereignisse und der Geschiebetransportprozesse kann derzeit nicht erfolgen.

Äolische Prozesse

Fragen nach Änderungen der äolischen Prozesse aufgrund eines möglichen Klimawandels werden oft auf die Frage der Bodenerosion bzw. der Verlagerung und Transport von Partikel reduziert im Sinne von „Emission – Transmission – Immission". Zur Beurteilung der Auswirkungen dieser Prozesse auf die Reliefum- und -neubildung sind darüber hinaus eine Vielzahl weiterer Parameter – ganz entscheidend die Nutzung und die lokalen Oberflächengegebenheiten – mit in die Betrachtungen einzubeziehen (McVicar et al., 2012).

Aufgrund ihrer unterschiedlichen Oberflächenbeschaffenheit müssen die Landschaftsräume Österreichs in Bezug auf das Wirken äolischer Prozesse differenziert betrachtet werden. Neben den Hochgebirgsräumen, welche durch große vegetationsfreie Flächen gekennzeichnet sind und in denen aktuell durch den Rückzug der Gletscher neue Quellen für äolischen Sedimenttransport verfügbar werden, sind es vor allem intensiv (sowohl agrarisch als auch unbebaute Gebiete im Siedlungsraum) genutzte Flächen im Osten von Österreich, die durch das Wirken des Windes beeinflussbar sind.

Als wichtigstes Sediment in diesem Landschaftsbereich kann der durch äolische Akkumulationsvorgänge in den quartären Kaltzeiten entstandene Löss angesehen werden. Das Vorliegen dieses Sediments in all seinen Ausprägungen – inklusive der Komponenten Schwemmlöss, verlagerter Löss und Flugsand – ist vor allem für das Bundesland Niederösterreich von großer Bedeutung (Peticzka et al., 2010). Dieses Sediment ist von seiner Textur her durch sehr hohe Schluffanteile (63–2 µm) gekennzeichnet, die in den östlichen Bereichen bis zu 80 %, weiter im Westen 40–60 % ausmachen können Die Wechselwirkung von Ausblasungsgebieten und Ablagerungsgebieten ist maßgeblich für die Ausformung und Überprägung der Reliefsituation in ihrer heutigen Ausprägung und damit auf die Auswirkungen des aktuellen Klimawandels auf äolische Prozesse.

Im Gegensatz zu den alpinen Bereichen, welche durch den Gletscherrückzug direkt zu Quellen des äolischen Abtrages und der Winderosion werden, sind diese Sedimentkörper jedoch pedogenetisch stark überprägt und werden heute überwiegend durch Schwarzerdeböden des Typus „Tschernosem"

überlagert. Dieser Bodentyp gilt in seiner heutigen Ausprägung als nicht, bzw. mäßig (wind)erosionsgefährdet (BMLF, 1975). Eine Änderung zu höheren Windgeschwindigkeiten kann prinzipiell zu erhöhter Erosion führen, die Auswirkungen sind immer unter den gegebenen bodenkundlichen Standortbedingungen zu betrachten (siehe auch Band 2, Kapitel 5). Diese sind in den agrarisch intensiv genutzten Flächen von der jeweiligen Frucht und damit einhergehend von der Bodenbedeckung abhängig. So stellt unter geschlossener Vegetationsdecke die Winderosion – auch bei hohen Windgeschwindigkeiten – eine vergleichsweise vernachlässigbare Größe dar (Mendez und Buschiazzo, 2010). Dies steht natürlich im starken Gegensatz zu den äolischen Erosionsprozessen, die etwa unter Schwarzbrache zu erwarten sind.

Eine weitere, die Winderosion massiv beeinflussende Größe ist die aktuelle Bodenfeuchte. Wenngleich auch dieser Parameter seriös nicht ohne die jeweilige Frucht betrachtet werden sollte, so kann doch von einer verminderten Erosionsgefährdung an gut durchfeuchteten Standorten ausgegangenen werden (Webb und Strong, 2011). Hier zeigt sich die wohl signifikanteste Abhängigkeit zu möglichen Klimaänderungen. Eine Verlängerung der Zeitspannen ohne oder mit vernachlässigbaren Niederschlägen würde so direkt auf die (Wind)Erodibilität der Standorte wirken.

Zusammenfassend sei angemerkt, dass die Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf die Reliefentwicklung bedingt durch äolische Prozesse neben den lokalen, bodenkundlichen Standortfaktoren (Aggregatstabilität, Humusgehalt und Bodenfeuchte) auch immer unter dem Aspekt der jeweiligen Nutzung und damit verbunden der Vegetationsbedeckung gesehen werden muss. Eine Änderung der Nutzung – egal wodurch diese zustande kommt – ist daher in jede Prognose mit einzubeziehen. Dies zeigt sich unter anderem deutlich in den Sanddünen des Marchfeldes im Bereich Oberweiden östlich von Wien. Sowohl die Mobilisierung dieser Dünen im 10. und 11. Jahrhundert als auch die Stabilisierung durch die Aufforstungen im 18. Jahrhundert waren durch Nutzungsänderungen und nicht durch klimatologische Prozesse induziert worden (Mrkvicka und Schneider, 2005). Die für die Reliefentwicklung relevanten äolischen Prozesse der Erosion – und im geringeren Masse der Akkumulation – sind daher immer auch unter Einbeziehung der Nutzung zu betrachten.

4.3 Dienstleistungen der Reliefsphärensysteme
4.3 Services of geosphere systems

In der von ökologischer Seite geführten Diskussion der „Ecosystem Services" (siehe hierzu eine ausführlichere Diskussion in Band 2, Kapitel 1) kommt der Reliefsphäre kaum Bedeutung zu. Im Millennium Ecosystem Assessment wird der Begriff Geomorphologie dreimal verwendet, der Begriff Relief ebenfalls dreimal (Hassan et al., 2005), wobei Relief nur einmal in Bezug zu „Ecosystem Services" steht, nämlich als Grundlage der Landschaft im Kontext von Kulturraum. Der Begriff Geomorphologie steht neutral als ein Faktor im Abschnitt zu Naturgefahren. Sucht man nach weiteren geomorphologischen Termini häuft sich nur „Hang", entweder bei Definitionen von Gebirgsräumen und allgemeinen Beschreibungen oder im Zusammenhang mit Massenbewegungen und Erosion.

Dies ist allerdings auch nicht unbedingt überraschend, da das Relief zwar als abiotischer Faktor Ökosysteme mitsteuert, zeitlich aber im Vergleich zur ökologischen Dynamik relativ konstant ist. Ökosystemprozesse und Funktionen werden weitgehend von biotischen Prozessen gesteuert, beispielsweise durch die unmittelbare Reaktion von Vegetation auf Klimavariabilität und Landnutzung. Im Millennium Ecosystem Assessment wird deshalb definiert: „Ecosystem services are the benefits people obtain from ecosystems." (Hassan et al., 2005). Damit stehen die Prozesse und Funktionen von Ökosystemen im Zentrum der Betrachtung. Die Reliefsphäre ist somit zwar eingebunden, da sie Standortbedingungen von Ökosystemen beeinflusst, sie nimmt aber nicht direkt am biologischen Kreislauf teil, sondern nur indirekt über den geologischen Kreislauf (Neumeister, 1988). Konsequent definieren de Groot et al. (2002) „only those goods and services are included that can be used on a sustainable basis, in order to maintain the ecosystem functions and associated ecosystem processes and structures". Das Verb „use" (benutzen, verbrauchen), ist dabei entscheidend. Relief wird im Sinne von „Ecosystem Services" im weiteren Sinn zwar verbraucht, beispielsweise beim Straßen- und Pistenbau oder im Zuge von landwirtschaftlicher Nutzung. Relief wird aber nur in geringem Umfang durch Ökosystemprozesse nachgebildet und so ist es in der wissenschaftlichen Debatte um Ökosystemdienstleistungen nur indirekt zu finden, wie oben bereits diskutiert. Eine Ausnahme stellt hier die Terrassenkultur an Hängen dar, in der ein Relief künstlich so geformt wird, dass bestimmte Ökosystemdienstleistungen genutzt werden können, nämlich vor allem landwirtschaftlicher Ertrag sowie Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit (Verringerung

der Bodenerosion und des Oberflächenabflusses). In Österreich spielt die Terrassenkultur im Weinbau eine Rolle.

Da der oben erwähnte große geologische Kreislauf auf den Klimawandel deutlich langsamer reagiert als Kreisläufe in Ökosystemen, abgesehen von Massenbewegungen und Flussdynamik, fehlt auch die wissenschaftliche Auseinandersetzung über „Ecosystem Services“ und Reliefsphäre im Kontext des Klimawandels.

Innerhalb der Fachdisziplin der Geomorphologie entwickelte sich in der letzten Dekade die programmatische Forderung „geomorphologische“ Dienstleistungen in Anlehnung an die Ökosystemdienstleistungen zu definieren (siehe z. B. das jüngste Geomorphologie-Handbuch von Gregory und Goudie, 2011). Einigermaßen befriedigende Konzepte gibt es jedoch erst zu zwei Aspekten der kulturellen Dienstleistungen. Zum einen befasst sich die Working Group „Geomorphosites“ der International Association of Geomorphologists (IAG) intensiv mit der Unterschutz-Stellung herausragender geomorphologischer Formen und Landschaften. Zum anderen ist die Literatur zur Aufbereitung von geomorphologischen Kenntnissen für die Beförderung von Wissen und Bildung angewachsen (z. B. Davis, 2002).

Der Einfluss des Klimawandels auf Reliefformungsprozesse wird von geomorphologischer Seite ähnlich wie von ökologischer Seite beurteilt. Für die Veränderung geomorphologischer Formen und Prozesse sind drei Steuerfaktoren verantwortlich, nämlich Tektonik, Klima und der Mensch selbst. Tektonische Impulse können sich sowohl rasch als auch langsam auswirken, klimatische Impulse führen meist zu längeren Responsezeiten in den geomorphologischen Prozessen, anthropogene Impulse aber werden in den meisten Fällen sehr rasch wirksam (Slaymaker et al., 2009; Gregory und Goudie, 2011). Folgerichtig ist der Schluss zu ziehen, dass im 21. Jahrhundert die dominanten Steuerfaktoren für Veränderungen der Reliefsphäre die direkten menschlichen Eingriffe in die formschaffenden Prozesse sind. Auf der Bühne dieser raschen gegenwärtigen anthropogenen Reliefveränderungen kann allerdings der zusätzliche Klimawandel eine unerwartete Verschlechterung des Landnutzungspotentials auslösen (siehe Beispiel in Abschnitt 4.3.4).

Zusammenfassend ist festzustellen, dass weder im Millennium Ecosystem Assessment noch in ökologischen Fachzeitschriften der Einfluss des Klimawandels auf die Reliefsphäre diskutiert wird. In der geomorphologischen Literatur wurden bislang ausschließlich zwei Aspekte der kulturellen Dienstleistungen adressiert. Sucht man nach dieser Thematik unter dem Blickwinkel des Österreich-Bezugs, so steht man vor einem nahezu unbeschriebenen Blatt!

Bevor auf die verschiedenen „Services“ im Detail eingegangen wird, sei kurz der Einfluss des Reliefs auf Standort- und Nutzungsbedingungen in Österreich charakterisiert. Dieser ist in der Alpenregion und in den außeralpinen Gebieten grundlegend verschieden. In den Alpen sind Hangneigung und Exposition, abgesehen vom Ausgangsgestein, die wichtigsten Parameter, die über die potentielle natürliche Vegetation (PNV) und deren Nutzung und Überprägung, die landwirtschaftliche Inwertsetzung der Flächen und die Siedlungs- und Infrastrukturmöglichkeiten entscheiden. Historische Siedlungs- und Nutzungsstrukturen sind weitgehend an Verflachungen auf Trogschultern, Flussterrassen, Schwemm- und Murkegel gebunden. Zur Nutzungsproblematik dieser Kegel im Zeichen des Klimawandels siehe Abschnitt 4.2.1. Außeralpin vereinen die quartären Schotterterrassen der größeren Flüsse in vielen Aspekten optimale Standortsbedingungen für die menschliche Nutzung. Sie bieten flaches Bauland, große Grundwasserspeicher für die Wasserversorgung, unmittelbaren Zugang zu Baustoffen sowie ertragreiche Böden auf den höheren, mit Löss bedeckten Terrassen. Alle außeralpinen Schotterterrassen sind daher Zentrum einer raumplanerisch schwierig zu lösenden Verdichtung von Siedlung, Industrie und Agrarflächen. In Bezug auf den Klimawandel ist aber weder in alpinen noch in außeralpinen Gebieten eine dramatische Veränderung der basalen Reliefverhältnisse zu erwarten.

4.3.1 Supporting Services

Nach dem Millennium Ecosystem Assessment (Hassan et al., 2005) zählen die Bodenbildung, die Photosynthese und die darauf basierende Primärproduktion, der Nährstoff- sowie der Wasserkreislauf zu den Supporting Services. Diese Services werden alle über den Standortfaktor Relief indirekt gesteuert, indem, wie oben geschildert, das Relief beispielsweise die PNV und deren Nutzung steuert und so die Photosyntheseleistung der Vegetation und damit deren Primärproduktion. Dies gilt auch für Grasland und Ackerpflanzen. Entscheidend sind aber vor allem die Prozesse der Biosphäre und der Einfluss des Klimawandels auf diese Prozesse. Der Faktor Relief bleibt in den Zeitskalen des anthropogenen Klimawandels und der Ecosystem Services weitgehenden konstant bzw. gilt als Störung, wenn Massenbewegungen Vegetation zerstören und damit Biomasse zeitweise reduzieren. Gleiches gilt im Prinzip für den Einfluss der Reliefsphäre auf die Bodenbildung und den Wasserkreislauf. Auch der Nährstoffkreislauf ist eng an die Vegetationsausstattung, die Bodenprozesse und die Wasserverfügbarkeit gekoppelt, und damit übt das Relief auch hier indirekt Einfluss aus.

Zusammenfassend sei vermerkt, dass direkte Einflüsse des Klimawandels auf die Biosphäre, den Boden, Wasserkreislauf und damit auf die Primärproduktion sowie Nährstoffkreisläufe bedeutender sind und schneller wirken, als langsame Veränderungen der Reliefsphäre und deren indirekter Einfluss. Die Reliefsphäre ist somit in der Diskussion über Veränderungen von Supporting Services im Kontext des Klimawandels vernachlässigbar.

4.3.2 Provisioning Services

Unter Provisioning Services versteht man u.a. die Erzeugung von Nahrung, Holz, Fasermaterial, diatomischen Mineralien, Medizinalpflanzen, genetischen Ressourcen, Trinkwasser, sowie Energie (Hydroenergie, Wind- und Biomasse-Energie; Hassan et al., 2005). Auf diese Provisioning Services übt das Relief indirekten Einfluss aus. Der Einfluss des Klimawandels wird schneller und direkter auf die Biosphäre selbst spürbar sein, als durch über etwaige Reliefveränderungen ausgelöste Prozesse.

Im Falle des Weinbaus wird das Relief von Menschenhand beeinflusst, um einen erhöhten Ertrag an Feldfrüchten, sowie verringerte Bodenerosion (Erhalt der Bodenfruchtbarkeit) zu erreichen. In anderen Weltregionen wird der verstärkte Terrassenfeldbau als Anpassung an zu erwartende größere Trockenheit vorgeschlagen (Hassan und Nhemachena, 2008). Eine Anpassungsstrategie, die im Weinbau diskutiert wird, ist die Verlagerung von Anbaugebieten, in höhere Lagen (Soja, 2010). Dies würde somit zu einem indirekten Einfluss des Klimawandels auf das Relief führen, wenn neue Terrassen angelegt würden, um Ertragseinbußen in niederen Lagen durch erneute Erschließung von ökologischen Dienstleistungen in höheren Lagen wett zu machen. Allerdings ist die Terrassenkultur arbeitsaufwändig und somit teuer. Schon jetzt ist in manchen Betrieben fraglich, ob die bestehenden Terrassen weiter gepflegt und genutzt werden können (Wimmer, 2009). Finanzielle Gründe werden daher eine entscheidende Rolle spielen, ob ein einzelner Weinbauer/eine einzelne Weinbäuerin die Anpassungsstrategie der Neuerschließung eines Weingartens in höherer Lage verwirklichen kann.

4.3.3 Regulating Services

Unter Regulating Services versteht man u.a. Kohlenstoffspeicherung und Klimaregulierung, Abfallabbau und Entgiftung, Filterung von Wasser und Luft, Steuerung von Wasserabfluss sowie Erosion, Kontrolle von Naturgefahren, Kontrolle von Krankheiten und Schädlingen oder auch die Bestäubung (Hassan et al., 2005). Das Relief übt auf die Regulating Services indirekten Einfluss aus. Im Falle der Terrassenkultur im Weinbau wird das Relief gezielt beeinflusst, um sich Regulating Services zunutze zu machen, nämlich die verringerte Bodenerosion und die größere Verweilzeit des Wassers in flacheren Hangneigungen, die somit zu größeren und nachhaltigeren Erträgen führen (Berhe et al., 2012). Dies wird im Hinblick auf den Klimawandelanpassungen des Weinbaus im Abschnitt 4.3.2 diskutiert.

4.3.4 Cultural Services

Exemplarisch können für Österreich eine Reihe von Zusammenhängen zwischen Reliefformen und den verschiedenen Aspekten der kulturellen Werte (im Folgenden kursiv angeführt) identifiziert werden.

Die *kulturelle Diversität* des Landes beruht unter anderem auf den völlig unterschiedlichen Lebensumständen in Gebieten mit hohen (Alpenraum), geringeren (Alpenvorland und Böhmische Masse) sowie unbedeutenden Reliefunterschieden (Ostösterreich). Sakrale Bauten und Denkmäler als Ausdruck *spiritueller und religiöser Werte* wurden häufig auf Kulminationspunkten des Reliefs errichtet. Auf diese Weise entstanden einzigartige Kulturlandschaften. Ein Beispiel hierfür ist die Region „Salzburgischer Flachgau" im Zungenbecken des eiszeitlichen Salzach Vorlandgletschers, in der die Kuppen der Grundmoränen-Landschaft (morphogenetisch meist Drumlins) häufig von Kirchen, Kapellen und Bildstöcken gekrönt und akzentuiert sind. Um den *Wissenstransfer* über die Entstehung bestimmter Landschaftsformen und Landschaften nehmen sich elf geomorphologische Lehrpfade im Nationalpark Hohe Tauern[2] an. Aber auch in vielen Tourismusgemeinden Österreichs wird in Informationszentren und auf Schautafeln entlang der Wanderwege geomorphologisches Wissen für Laien aufbereitet; insbesondere die Zahl der Eiszeitwanderwege ist beeindruckend. Die Bedeutung des Reliefs als Grundlage für *Freizeitsport und Erholung* braucht im Tourismusland Österreich kaum betont zu werden. Das alpine Relief schafft die notwendigen Hangneigungen und die entsprechende Seehöhe für das Skilaufen und steht so im Zentrum des Wintertourismus. Der Sommertourismus knüpft sich zum einen an die Voralpenseen, die während der Eiszeit durch glaziale Beckenerosion angelegt wurden, zum anderen an das Wandererlebnis in schönen „alpinen" Landschaften. „Alpine Landschaften" beinhalten die Kulturlandschaft der Almen, deren Entwicklung in der Existenz von (glazial geschaffenen) Flachformen

[2] www.hohetauern.at

in höheren Stockwerken der Alpen gründet. An „alpine Landschaften“ knüpft sich aufgrund ihrer Naturnähe aber auch die gesellschaftliche Erwartung, dass es sich um Landschaften von hohem ästhetischem Wert handelt. Wie Untersuchungen im Rahmen des „Man and Biosphere“ Programms der UNESCO zeigten spielt in den alpinen Hochgebirgslandschaften Österreichs das Relief einen dominanten Faktor im Zustandekommen ästhetischer Landschaftserlebnisse. Die Präsenz vieler unterschiedlicher Reliefformen oder aber starke Reliefkontraste rufen ein positives Landschaftserlebnis hervor. Hingegen führen Reliefelemente, die als „künstlich geschaffen“ wahrgenommen werden, wie z. B. herausgesprengte und völlig glatt einplanierte Skipistenbänder, zu starken Einbrüchen des Landschaftserlebnisses (Hamann, 1988; Embleton-Hamann, 1994). In den letzten zwei Jahrzehnten haben anthropogene Reliefelemente im österreichischen Alpenraum durch die Anlage von Speicherseen für die Skipistenbeschneiung noch deutlich zugenommen (Hahn, 2004). Sie bilden einen groben Verstoß gegen das *„sense of place“* Konzept. Dieses Konzept kristallisiert sich innerhalb der Untersuchungen zur optischen Qualität von Landschaften immer mehr als kritisches Konzept heraus (siehe z. B. Van den Berg et al., 2003) und besagt, dass eine Naturszene keine fremdartigen (= gebauten) Elemente enthalten sollte.

In den Dienstleistungen der Reliefsphäre für Tourismus und Erholung wird sich die Klimaerwärmung zumindest indirekt auswirken. Sie ist, wie in Band 2, Kapitel 2 und 6 sowie Band 3, Kapitel 4 eingehend dargestellt wird, mit überwiegend negativen Konsequenzen für den Wintertourismus behaftet. In manchen Regionen Österreichs ist bereits in 10 bis 15 Jahren mit unzureichenden Schneebedingungen und ökonomisch nicht mehr tragbaren Beschneiungskosten zu rechnen. Umgekehrt werden aber die steigenden Temperaturen den Sommertourismus in Österreich begünstigen und konkurrenzfähig gegenüber dem dann zu heißen Mittelmeerraum machen. Wirtschaftlich wird also im unteren Stockwerk der Alpen eine Umstellung auf den Sommertourismus erfolgen müssen. Dieser benötigt, wie gezeigt, intakte und ästhetische Landschaftsbilder, in denen die künstlichen Landschaftselemente der heutigen Wintersport Industrie ein äußerst problematisches Erbe darstellen werden.

4.4 Forschungsbedarf
4.4 Research needs

Die folgenden Fragen zum Themenbereich „Einfluss des Klimawandels auf die Reliefsphäre“ fassen den bisher aufgezeigten Forschungsbedarf zusammen. Grundlegend sollten diese immer in verschiedenen zeitlichen und räumlichen Dimensionen und im historischen, momentanen und zukunftsorientierten Kontext bearbeitet werden.

- Wie stark ist die Dynamik in der Reliefsphäre vom Klimawandel abhängig?

Es gilt zu klären, welche natürlichen, über Jahrhunderte und Jahrtausende andauernden Schwankungen, die Dynamik der Reliefsphäre bestimmen und welche besondere Bedeutung dem aktuellen, durch den anthropogenen Einfluss verstärkten, Klimawandel in der Veränderung dieser Dynamiken zukommt.

- Wie kann bei der Analyse der beobachtbaren Veränderungen in der Reliefsphäre, zwischen den Auswirkungen des Klimawandel und der direkten menschlichen Aktivtäten differenziert werden?

Zu untersuchen ist, welche der festzustellenden Änderungen in der Reliefsphäre eindeutig, d.h. auch quantifizierbar auf den Klimawandel zurückzuführen sind und welche auf den direkten (z. B. Hangplanierungen, Gerinnemodifikationen) und indirekten (z. B. geänderte Hangdrainagen, Entwaldung oder Aufforstung) Einfluss menschlicher Aktivitäten zurückzuführen sind. Erschwerend ist hierbei, dass diese beiden Einflüsse in der Reliefsphäre häufig parallel ablaufen, sich teilweise aufheben, abschwächen aber auch verstärken.

- Welchen Einfluss hat der Klimawandel kurz-, mittel- und langfristig auf Veränderungen in der Vorbereitung, dem Auslöser und dem Bewegungsablauf der gravitativen Massenbewegungen?

Auf die gravitativen Massenbewegung hat der Klimawandel in unterschiedlichen Bereichen einen umfassenden Einfluss. Es werden vorbereitend Faktoren durch den Klimawandel verändert (z. B. geänderte Vegetation, veränderte Verwitterung des Anstehenden), die für die Disposition gravitativer Massenbewegungen wichtig sind. Auslösende Faktoren können sich ändern (z. B. Erhöhung / Erniedrigung des Gesamtniederschlags oder der Niederschlagsintensität, Verschiebung des festen und flüssigen Niederschlagsanteils). Die für den Bewegungsablauf der gravitativen Massenbewegungen verantwortlichen kontrollierenden Faktoren (z. B. Vegetation, Bodenstruktur und

-feuchte, Niederschlagsverteilung) können sich durch den Klimawandel verändern. Diese Wechselwirkungen gilt es im kurz-, mittel- und langfristigen Verlauf zu untersuchen.

- Welche Bedeutung kommt dem Klimawandel für Veränderungen bei den periglazialen Prozessen zu?

Die periglazialen Prozesse wie u. a. die Solifluktion, der Frostsprengung und Kryoturbation und charakteristische periglaziale Formen wie u. a. Frostmusterböden, Blockgletscher und ganz besonders der Permafrost werden massiv durch den Klimawandel modifiziert. Hierzu gehören die Auswirkungen erhöhter Temperaturen und veränderter Strahlungsbilanzen genauso wie unterschiedliche Niederschlags- und Feuchtigkeitsregime im zeitlichen Verlauf und der räumlichen Ausprägung.

- Welche Auswirkungen haben veränderte glaziale Prozesse auf die Landschaftsentwicklung?

Neben der aktuellen Veränderungen der Gletscher an sich (im Sinne geänderter Massenbilanz, Albedo etc.) sind auch die Reliefsphären von diesen neuen Bedingungen des glazialen Systems betroffen. Hierzu gehört die geänderte, langfristige Erosionsleistung von Gletschern genauso wie die Produktion und Lieferung von Feinsedimenten, die im folgenden Reliefsystem maßgebliche Veränderungen hervorrufen können (u. a. Verlandung von Seen, erhöhte sommerliche Hochwasserspitzen mit entsprechenden Geschiebetransport etc.). Diese Veränderungen gilt es im Kontext des Klimawandels zu adressieren.

- Welche veränderten Aktivitäten bei Schneelawinen sind mit dem Klimawandel zu erwarten?

Zwar gibt es bereits einige sporadische Untersuchungen zu den Schneelawinen im geänderten Klima, aber detaillierte Untersuchungen bezüglich der Auswirkungen des Klimawandels auf die unterschiedlichen Lawinentypen in ihrer raumzeitlichen Veränderung wären noch ausständig. Von zentraler Bedeutung wäre in diesem Kontext auch die Berücksichtigung der Waldentwicklung.

- Steuern die anthropogenen Faktoren oder der Klimawandel die Veränderungen bei Waldbränden?

Obwohl Waldbrände bisher in Österreich nur ein untergeordnetes Thema für die Entwicklung der Reliefsphäre sind könnte sich dies durch veränderte klimatische Rahmenbedingungen massiv verändern. Es gälte zu untersuchen, wie sich in diesem Fall der Klimawandel auswirkt und welche Folgewirkungen für die Landschaften zu erwarten wären, auch im Sinne einer veränderten Nutzung und besonders im Kontext der Schutzfunktion des Waldes gegenüber Naturgefahren.

- Welche Effekte in der Reliefsphäre können durch geänderte Wasserverfügbarkeit in den Flusssystemen erwartet werden?

Neben der Wasserversorgung hat die geänderte Wasserführung von Flusssystemen (inkl. Wildbäche) einen massiven Einfluss auf jegliche Sedimentbewegung. Es gilt hierbei weiter zu untersuchen, welche veränderten Geschiebebereitstellungen, -führungen und -ablagerungen eindeutig auf den Klimawandel und welche auf den menschlichen Einfluss über die Modifikation der gesamten Einzugsgebiete (inkl. der Gerinne an sich) zurückzuführen sind.

- Wie stark sind äolische Prozesse durch den Klimawandel betroffen und welche Auswirkungen können für Österreich erwartet werden?

Der Einfluss der äolischen Prozesse in Österreich durch den Klimawandel ist nur marginal untersucht. Es gilt hier, die Beziehungen zwischen geänderten Klimaparametern (z. B. Feuchtigkeit, Windfelder) und den äolischen Prozessen im Kontext der Vegetationsbedeckung und Landnutzung zu untersuchen und in einen längeren Holozänen, aber auch Pleistozänen Bezug einzuordnen, sowie Zukunftsszenarien zu entwickeln.

- Wie bedeutend ist für die Ökosystemdienstleistungen der Reliefsphäre der Klimawandel?

Die ökosystemaren Dienstleistungen sind in Bezug auf die Reliefsphäre in weiten Bereichen vollkommenes Neuland. Es gilt hier, die unterstützenden, bereitstellenden, regulierenden und kulturellen Dienstleistungen der Reliefsphäre grundlegend aufzuarbeiten und in den Kontext der möglichen, durch den menschlich verstärkten Klimawandel verursachten, Veränderungen zu stellen.

- Welche Kaskadeneffekte werden in der Reliefsphäre durch den Klimawandel ausgelöst?

Häufig werden besonders einzelne Effekte des Klimawandels in der Reliefsphäre betrachtet, z. B. die Auswirkungen veränderter Niederschlagsextreme auf die Muraktivitäten. Hier wäre zu untersuchen, inwieweit welche Änderungen welche Folgewirkungen in der Reliefsphäre nach sich ziehen. Beispielsweise wird eine erhöhte Murtätigkeit mehr Geschiebe in den Vorfluter liefern und dessen Abflussverhalten verändern. Gleichzeitig könnte im Initiierungsgebiet der Mure durch den Massenverlust zur Instabilität eines größeren Hangbereichs führen, die sich möglicherweise in Form einer großen Rutschung oder Sackung manifestieren könnte. Es ist klar, dass auch hier der menschliche Einfluss massiv wirkt. Deshalb müsste man auch hier

besonders darauf achten, welche Anteile möglicher Kaskadeneffekte eindeutig auf den Klimawandel zurückzuführen sind.

- Welche direkten Vor-Ort-Veränderungen und indirekten regionalen Modifikationen der Reliefsphäre können kurz-, mittel- und langfristig durch den Klimawandel erwartet werden?

Es ist evident, dass die Auswirkungen des Klimawandels direkt vor Ort erfolgen, dass sich diese Auswirkungen aber auch in weiteren Distanzen bemerkbar machen. Wenn beispielweise ein großer Bergsturz durch veränderte Niederschlagsextreme ausgelöst wurde und das Tal dauerhaft versperrt ist, wird sich das gesamte fluviale System an die neuen Bedingungen anpassen müssen und insofern müssten auch Wirkungen in großer Distanz festzustellen sein. Dementsprechend sollte anhand verschiedener Beispiele aus der Reliefsphäre untersucht werden, welche direkten vor-Ort und Fernwirkungen eindeutig dem Klimawandel zuzuordnen sind.

- Welche Pufferungskapazitäten hat die Reliefsphäre gegenüber dem Klimawandel und wo liegen die nicht umkehrbaren Kipppunkte in unserem Geosystem?

Wie jedes System hat auch die Reliefsphäre Möglichkeiten externe Wirkungen zu puffern. Es gälte hier diese Pufferungskapazitäten im Detail für die verschiedenen Kompartimente der Reliefsphäre zu untersuchen. Von besonderer Bedeutung wäre auch die Untersuchung der verschiedenen, nicht mehr umkehrbaren Kipppunkte in der Reliefsphäre. Unter Kipppunkt wird in diesem Kontext verstanden, dass beim Überschreiten dieser Punkte das System nicht mehr in den Originalzustand zurückkehren kann. Beispielsweise kann ein Hangsystem gewisse hydrometeorologische Schwankungen puffern, aber nach dem Überschreiten eines Kipppunktes findet die unumkehrbare Hangrutschung statt.

- Welche gesellschaftlichen Auswirkungen haben die durch den Klimawandel hervorgerufenen Veränderungen in der Reliefsphäre?

Die Reliefsphäre verändert sich kontinuierlich weiter. In einem ersten Schritt wäre dementsprechend zu untersuchen, welche dieser Entwicklungen ganz normale, natürliche raumzeitliche Entwicklungen darstellen und welche davon eineindeutig dem Klimawandel zuzuordnen sind. In einem zweiten Schritt ist es dann notwendig, die Auswirkungen speziell der durch den Klimawandel hervorgerufenen Änderungen auf die Gesellschaften zu untersuchen, rückblickend im Kontext der historischen Entwicklungen aber auch zukunftsorientiert im Sinne von Entwicklungsszenarien.

- Welche Resilienzstrategien und Adaptierungsoptionen hat die Gesellschaft bezüglich der durch den Klimawandel zu erwartenden Veränderungen der Reliefsphäre?

Es gälte hier zu untersuchen, welche gesellschaftlichen Strategien zu Stärkung der Resilienz und der verschiedenen Optionen der Adaptierung an zu erwartende Veränderungen in der Reliefsphäre entwickelt werden können. Neben der Ursachenanalyse würde hier besonders der Fokus auf dem Umgang mit möglichen Veränderungen in der Reliefsphäre liegen. Hierbei könnten gesellschaftliche Handlungsoptionen zu zukünftigen Entwicklungen ausgearbeitet werden.

4.5 Kurzfassung
4.5 Summary

Die Reliefsphäre ist intensiv dem Klimawandel ausgesetzt. Hierbei ist eine starke Wechselwirkung zwischen Klima und dem Relief zu konstatieren. Das Klima wird besonders in den Gebirgsräumen stark vom Relief geprägt, gleichzeitig beeinflussen die externen Kräfte des Klimas aber auch das Relief nachhaltig.

Diese Kapitel widmet sich der Frage des Einflusses des Klimawandels auf das Relief und adressiert somit nur einen Teil der Wechselwirkungen. Eine weitere wesentliche Gestaltungskraft der Reliefsphäre ist der Mensch, auf die aber im Folgenden zwar nicht vertieft, aber doch im Kontext des Klimawandels eingegangen wird. Es werden die wesentlichen in Österreich wirkenden geomorphologische Prozesse wie gravitative Massenbewegungen (Rutschungen, Muren, Stürze), Schneelawinen, periglaziale, glaziale, fluviale und äolische Prozesse anhand vieler Beispiele dargestellt und hinsichtlich der feststellbaren oder potentiell möglichen Veränderung beleuchtet. Abschließend wird die Reliefsphäre noch im Kontext der ökosystemaren Dienstleistungen diskutiert.

Von zentraler Bedeutung sind bei allen Untersuchungen die Dynamiken, welche sich in unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Maßstäben artikulieren und von denen die verschiedenen Prozessdomänen in unterschiedlichem Ausmaß betroffen sind. Bei den gravitativen Massenbewegungen spielen die klimatischen Bedingungen eine zentrale Rolle. Die flachgründigen Rutschungen treten hierbei in ganz Österreich auf, wobei besonders die Flyschzone als besonders rutschungsanfällig identifiziert wurde. Muren sind dagegen in Gebieten mit großen Reliefunterschieden und transportierbaren Sedimenten anzutreffen. Felsstürze und Steinschlag benötigen eine steile Wand als Quellgebiet und kommen deshalb auch nur in stark reliefiertem Gelände vor. Auch die großen tiefgründigen

Massenbewegungen sind besonders auf die alpinen Gebiete Österreichs beschränkt. Alle Typen der gravitativen Massenbewegungen sind u. a. sehr stark direkt von den hydrometeorologischen Konditionen oder indirekt von Faktoren wie Vegetationsbedeckung abhängig und insofern auch einem potenziellen Wandel unterzogen.

Die Schneelawinen sind sehr stark abhängig vom Aufbau der Schneedecke, vom Relief, von den Waldbeständen und den klimatischen Gegebenheiten. Es kann gezeigt werden, dass einerseits die Schneemächtigkeit aber auch der Schneedeckenaufbau stark vom Klimawandel beeinflusst ist. Dieser wirkt auch massiv auf die periglazialen Prozesse. Die bereits an schwach geneigten Hängen auftretende Solifluktion ist besonders von der zur Verfügung stehenden Feuchtigkeit und dem Frost-/Tauzyklus abhängig. Blockgletscher kommen in den österreichischen Alpen häufig vor und sind indirekte Indikatoren für Permafrost. Der Aktivitätsgrad dieser Schuttmassen ist auch sehr abhängig vom Klimawandel, der das Eisvorkommen in den Schuttmassen und die Auftautiefe sowie die Verbreitung des Permafrosts bestimmt.

Eine weitere Bedeutung des Einflusses des Klimawandels in der Reliefsphäre sind die zu erwartenden Veränderungen bei den Waldbränden. Auch hier ist zukünftig mit einer variierenden Stärke und Häufigkeit zu rechnen, mit all den Konsequenzen im geänderten Prozessgefüge an und in den betroffenen Flächen. Zusätzlich sind vom Klimawandel veränderte Sedimenttransporte zu erwarten. Dies beinhaltet bei Flüssen modifizierte Sedimentfrachten, bei Gletschern neue Sedimentaufbereitungen und -transporte durch geänderte Bewegungs- und Schmelzvorgänge sowie bei äolischen Prozessen die Winderosion mit all ihren Folgeerscheinungen.

Auch die Dienstleitungen der Reliefsphärensysteme sind potenziell vom Klimawandel beeinflusst, wenn auch nur mit untergeordneter Bedeutung. Im vorliegenden Beitrag werden besonders die Terrassenkulturen an Hängen als stark beeinflusstes System angeführt. Im Kontext der Supporting Services der Reliefsphäre wird festgehalten, dass deren Veränderungen vernachlässigbar gering seien. Bei den Provisioning Services gibt es einzelne Bereiche wie den Weinbau, der möglicherweise betroffen sein könnte. Auswirkungen auf die Cultural Services sind besonders in der kulturellen Diversität, in den sakralen und religiösen Werten, im Freizeitsport und in der Erholung sowie bei veränderten ästhetischen Werten zu erwarten.

In den Beiträgen wird deutlich, dass zwischen den „natürlichen", „normalen" kontinuierlichen Veränderungen und einem möglicherweisen geänderten klimatischen Einfluss, sei es momentan oder in Zukunft, nur sehr schwer unterschieden werden kann. Dieser Versuch der klaren Identifizierung des klimatischen Einflusses auf die Reliefsphäre wird noch durch den sogenannten „Human Impact" massiv erschwert. Die fundamentale zukünftige Herausforderung besteht in der eindeutigen Trennung zwischen den Auswirkungen in der Reliefsphäre aufgrund des Klimawandels, bzw. aufgrund des menschlichen Einflusses. So lange diese Trennung nicht klar gezogen werden kann wird es sehr schwierig sein, eine klare Zuordnung zu den Ursachen und Wirkungen des klimatischen Einflusses auf die Reliefsphäre mit entsprechenden Vertrauensbereichen und Unsicherheiten zu identifizieren. Hierbei sind besonders die Zeitreihenanalysen von übergeordneter Bedeutung – nur durch diese kann die enge Kopplung differenzierter betrachtet werden.

4.6 Literaturverzeichnis
4.6 References

Abele, G., 1974. Bergstürze in den Alpen: ihre Verbreitung, Morphologie und Folgeerscheinungen, Wissenschaftliche Alpenvereinshefte. Dt. Alpenverein.

Abermann, J., Lambrecht, A., Fischer, A., Kuhn, M., 2009. Quantifying changes and trends in glacier area and volume in the Austrian Ötztal Alps (1969–1997–2006). The Cryosphere Discussions 3, 415–441.

Ahnert, F., 2003. Einführung in die Geomorphologie. Ulmer, Stuttgart (Hohenheim).

Alcoverro, J., Corominas, J., Gomez, M., 1999. The Barranco de Aras flood of 7 August 1996 (Biescas, Central Pyrenees, Spain). Engineering Geology 51, 237–255. doi:10.1016/S0013-7952(98)00076-3

Allen, S.K., Cox, S.C., Owens, I.F., 2011. Rock avalanches and other landslides in the central Southern Alps of New Zealand: a regional study considering possible climate change impacts. Landslides 8, 33–48. doi:10.1007/s10346-010-0222-z

Anderson, R.S., Anderson, S.P., 2010. Geomorphology: the Mechanics and Chemistry of Landscapes, 1. ed. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.

Andrecs, P., Hagen, K., Fromm, R., Gauer, P., Höller, P., Klebinder, K., Kohl, B., Lang, E., Markart, G., Perzl, F., 2010. AdaptEvent. Analyse der Sicherheit und Genauigkeit von Bemessungswerten bei gravitativen alpinen Naturgefahren und Ableitung von Anpassungsstrategien an den Klimawandel. Bundesforschungs- und Ausbildungszentrums für Wald, Naturgefahren und Landschaft, Vienna, Austria.

Andrecs, P., Hagen, K., Lang, E., Stary, U., Gartner, K., Herzberger, E., Riedel, F., Haiden, T., 2007. Dokumentation und Analyse der Schadensereignisse 2005 in den Gemeinden Gasen und Haslau (Steiermark). BFW-Schriftenreihe, Schriftenreihe des Bundesforschungs- und Ausbildungszentrums für Wald, Naturgefahren und Landschaft 6.

Arpaci, A., Malowerschnig, B., Sass, O., Vacik, H., 2014. Using multi variate data mining techniques for estimating fire susceptibility of Tyrolean forests. Applied Geography, in press (June 2014).

Auer, I., Böhm, R., Jurkovic, A., Lipa, W., Orlik, A., Potzmann, R., Schöner, W., Ungersböck, M., Matulla, C., Briffa, K., Jones, P.,

Efthymiadis, D., Brunetti, M., Nanni, T., Maugeri, M., Mercalli, L., Mestre, O., Moisselin, J.-M., Begert, M., Müller-Westermeier, G., Kveton, V., Bochnicek, O., Stastny, P., Lapin, M., Szalai, S., Szentimrey, T., Cegnar, T., Dolinar, M., Gajic-Capka, M., Zaninovic, K., Majstorovic, Z., Nieplova, E., 2007. HISTALP – historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region. International Journal of Climatology 27, 17–46. doi:10.1002/joc.1377

Bader, S., Kunz, P., 2000. Climate Risks: The Challenge for Alpine Regions. vdf Hochschulverlag AG, Bern.

Barsch, D., 1996. Rockglaciers: Indicators for the present and former geoecology in high mountain environments, Springer Series in Physical Environment. Springer, Berlin.

BAW, 2007. Integrated land use planning, Teilprojekt: Evaluierung von Bodenerosion und Schwebstoffeintrag im Einzugsgebiet der Ybbs (SACSES-INTERREG IIIb Endbericht). Petzen.

Bebi, P., Kulakowski, D., Rixen, C., 2009. Snow avalanche disturbances in forest ecosystems – State of research and implications for management. Forest Ecology and Management 257, 1883–1892. doi:10.1016/j.foreco.2009.01.050

Bender, O., Borsdorf, A., Fischer, A., Stotter, J., 2011. Mountains under climate and global change conditions – research results in the Alps, in: Blanco, J.A. (Ed.), Climate Change - Geophysical Foundations and Ecological Effects. InTech.

Beniston, M., Stephenson, D.B., Christensen, O.B., Ferro, C.A.T., Frei, C., Goyette, S., Halsnaes, K., Holt, T., Jylhä, K., Koffi, B., Palutikof, J., Schöll, R., Semmler, T., Woth, K., 2007. Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. Climatic Change 81, 71–95. doi:10.1007/s10584006-9226-z

Berhe, A.A., Harden, J.W., Torn, M.S., Kleber, M., Burton, S.D., Harte, J., 2012. Persistence of soil organic matter in eroding versus depositional landform positions. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences 117, 1–16. doi:10.1029/2011JG001790

Berti, M., Genevois, R., Simoni, A., Tecca, P.R., 1999. Field observations of a debris flow event in the Dolomites. Geomorphology 29, 265–274. doi:10.1016/S0169-555X(99)00018-5

Bhutiyani, M.R., 1994. Field investigations on meltwater percolation and its effect on shear strength of wet snow., in: Proceedings of the International Symposium on Snow. Presented at the International Symposium on Snow, Manali, India, pp. 85–88.

Blöschl, G., Schöner, W., Kroiß, H., Blaschke, A.P., Böhm, R., Haslinger, K., Kreuzinger, N., Merz, R., Parajka, J., Salinas, J.L., Viglione, A., 2011. Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft – Ziele und Schlussfolgerungen der Studie für Bund und Länder. Österr Wasser- und Abfallw 63, 1–10. doi:10.1007/s00506-010-0274-2

BMFL, 1975. Erläuterungen zur Bodenkarte 1 : 25.000 Kartierungsbereich Gänserndorf, Niederösterreich (Mit 13 Kt.) Österreichische Bodenkartierung: Bodenkarte 1 : 25.000 KB 27

BMLFUW, 2006. Hochwasser 2005 (Ereignisdokumentation der Bundeswasserbauverwaltung, des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinenverbauung und des Hydrographischen Dienstes). Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Sektion Wasser.

BMU, 2007. Climate Change in the Alps. Facts - Impacts - Adaptation. Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU), Berlin, Germany.

Böhm, R., 2008. Heiße Luft – Reizwort Klimawandel; Fakten – Ängste – Geschäfte. Edition VA bene, Wien-Klosterneuburg.

Bonzanigo, L., Eberhardt, E., Loew, S., 2007. Long-term investigation of a deep-seated creeping landslide in crystalline rock. Part I. Geological and hydromechanical factors controlling the Campo Vallemaggia landslide. Canadian Geotechnical Journal 44, 1157–1180. doi:10.1139/T07-043

Christensen, O.B., Christensen, J.H., 2004. Intensification of extreme European summer precipitation in a warmer climate. Global and Planetary Change 44, 107–117. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2004.06.013

Clague, J., Stead, D., 2012. Landslides Types, Mechanisms and Modeling. Cambridge University Press.

ClimChAlp, 2008. ClimChAlp – Climate Change, Impacts and Adaptation Strategies in the Alpine Space Strategic Interreg III B Alpine Space Project COMMON STRATEGIC PAPER.

Collison, A., Wade, S., Griffiths, J., Dehn, M., 2000. Modelling the impact of predicted climate change on landslide frequency and magnitude in SE England. Engineering Geology 55, 205–218. doi:http://dx.doi.org/10.1016/S0013-7952(99)00121-0

Crozier, M.J., 2010. Deciphering the effect of climate change on landslide activity: A review. Geomorphology 124, 260–267. doi:10.1016/j.geomorph.2010.04.009

Cruden, D.M., Varnes, D.J., 1996. Landslide types and processes, in: Turner, A.K., Schuster, R.L. (Eds.), Landslides: Investigation and Mitigation. National Academy Press, Washington D.C., pp. 36–75.

Davies, M.C., Hamza, O., Lumsden, B.W., Harris, C., 2000. Laboratory measurement of the shear strength of ice-filled rock joints. Annals of Glaciology 31, 463–467. doi:http://dx.doi.org/10.3189/172756400781819897

Davies, M.C.R., Hamza, O., Harris, C., 2001. The effect of rise in mean annual temperature on the stability of rock slopes containing ice-filled discontinuities. Permafrost and Periglacial Processes 12, 137–144. doi:10.1002/ppp 378

Davis, R.L., 2002. The value of teaching about geomorphology in non-traditional settings. Geomorphology 47, 251–260. doi:10.1016/S0169-555X(02)00096-X

De Groot, R.S., Wilson, M.A., Boumans, R.M.., 2002. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. Ecological Economics 41, 393–408. doi:10.1016/S0921-8009(02)00089-7

Debene, A., 2006. Modellierung anthropogener Eingriffe auf das Hochwasserabflussgeschehen in der Mesoskala. Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau, Wien.

Dehn, M., Bürger, G., Buma, J., Gasparetto, P., 2000. Impact of climate change on slope stability using expanded downscaling. Engineering Geology 55, 193–204. doi:http://dx.doi.org/10.1016/S0013-7952(99)00123-4

Delaloye, R., Perruchoud, M.A., Kaufmann, V., Bodin, X., Ikeda, A., Hausmann, A., Kääb, A., Kellerer-Pirklbauer, A., Krainer, K., Lambiel, C., Mihajlovic, D., Staub, B., Roer, I., Thibert, E., 2008. Recent Interannual Variations of Rockglaciers Creep in the European Alps, in: Proceedings of the Ninth International Converence on Permafrost (NICOP). University of Alaska, Fairbanks, Fairbanks, pp. 343–348.

Deline, P., Kirkbride, M.P., Ravanel, L., Ravello, M., 2008. The Tréla-Tete rockfall onto the Lex Blanche glacier, Mont Blanc massif, Italy, in September 2008. Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria 31, 251–254.

Déqué, M., 2007. Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and

statistical correction according to observed values. Global and Planetary Change 57, 16–26. doi:10.1016/j.gloplacha.2006.11.030

Dikau, R., Glade, T., 2002. Gefahren und Risiken durch Massenbewegungen. Geographische Rundschau 54, 38–47.

Djerbal, L., Melbouci, B., 2012. Le glissement de terrain d'Ain El Hammam (Algerie): causes et evolution. Bull Eng Geol Environ 71, 587–597. doi:10.1007/s10064-012-0423-x

Dobesberger, P., Zeidler, T., 2010. Klimawandel und Naturgefahrenmanagement im Energiesektor. BFW Praxisinformation 14–16.

Duc, P., Brändli, U.B., 2010. Der Schutzwald hat sich verbessert. Wald und Holz 1, 25–28.

Eavns, S.G., Scarascia Mugnozza, G., Strom, A., Hermanns, R.L. (Eds.), 2006. Landslides from Massive Rock Slope Failure. Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop, Celano, Italy, 16–21 June 2002, Nato Science Series: IV: (closed), Vol. 49.

Ebohon, B., Schrott, L., 2008. Modelling mountain permafrost distribution: A new permafrost map of Austria, in: Kane, D.L., Hinkel, K.M. (Eds.), Proceedings of the 9th International Conference on Permafrost. Presented at the International Conference on Permafrost, USPA, University of Alaska, Fairbanks, pp. 397–402.

Eckert, N., Baya, H., Deschatres, M., 2010a. Assessing the Response of Snow Avalanche Runout Altitudes to Climate Fluctuations Using Hierarchical Modeling: Application to 61 Winters of Data in France. Journal of Climate 23, 3157–3180. doi:10.1175/2010JCLI3312.1

Eckert, N., Parent, E., Kies, R., Baya, H., 2010b. A spatio-temporal modelling framework for assessing the fluctuations of avalanche occurrence resulting from climate change: application to 60 years of data in the northern French Alps. Climatic Change 101, 515–553. doi:10.1007/s10584-009-9718-8

Embleton-Hamann, C., Slaymaker, O., 2012. The Austrian Alps and paraglaciation. Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography 94, 7–16. doi:10.1111/j.1468-0459.2011.00447.x

European Avalanche Warning Services, 2013. Glossary on Snow and avalanches [WWW Document]. Glossary on Snow and avalanches, European Avalanche Warnung Services. URL http://www.avalanches.org/eaws/en/includes/glossary/glossary_en_all.html (accessed 2.11.14).

Evans, S.G., Scarascia Mugnozza, G., Strom, A., Hermanns, R.L., 2006. Landslides from massive rock slope failure. Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Massive Rock Slope Failure: New Models for Hazard Assessment, Celano, Italy, 16-21 June 2002, NATO science series. Springer, Berlin.

Fey, C., Zangerl, C., Haas, F., Rutzinger, M., Sailer, R., Bremer, M., 2012. Rock slide deformation measurements with Terrestrial Laser Scanning in inaccessible high mountain areas, in: EGU General Assembly Conference Abstracts.

Field, C.B., Barros, V., Stocker, T.F., Qin, D., Dokken, D.J., Ebi, K.L., Mastrandrea, M.D., Mach, K.J., Plattner, G.-K., Allen, S.K., Tignor, M., Midgley, P.M. (Eds.), 2012. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Finsterwalder, S., 1928. Begleitworte zur Karte des Gepatschferners. Zeitschrift für Gletscherkunde 16, 20–41.

Fischer, L., Purves, R.S., Huggel, C., Noetzli, J., Haeberli, W., 2012. On the influence of topographic, geological and cryospheric factors on rock avalanches and rockfalls in high-mountain areas. Natural Hazards and Earth System Sciences 12, 241–254. doi:10.5194/nhess-12-241-2012

Frei, C., Calanca, P., Schär, C., Wanner, H., Schädler, B., Haeberli, W., Appenzeller, C., Neu, U., Thalmann, E., Ritz, C., Hohmann, R., 2007. Grundlagen, in: OcCC / ProClim (Ed.), Klimaänderung Und Die Schweiz 2050 – Erwartete Auswirkungen Auf Die Umwelt, Gesellschaft Und Wirtschaft. Bern, pp. 11–24.

French, H.M., 2007. The Periglacial Environment. John Wiley & Sons.

Fuchs, S., 2009. Susceptibility versus resilience to mountain hazards in Austria—paradigms of vulnerability revisited. Natural Hazards Earth System Sciences 9, 337–352. doi:10.5194/nhess-9-337-2009

Fuchs, S., 2010. Auswirkungen des Klimawandels auf Naturgefahren – Herausforderungen für eine nachhaltige Landnutzung in alpinen Gebieten, in: ÖWAV (Ed.), Auswirkungen Des Klimawandels Auf Die Hydrologie Und Wasserwirtschaft in Österreich. Präsentation Der Aktuellen Studien. Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, Wien, pp. 169–180.

Fürst, J., Kling, H., Nachtnebel, H.P., Hörhan, T., 2010. Beobachtete Veränderungen in der Wasserbilanz Österreichs, in: ÖWAV (Ed.), Auswirkungen Des Klimawandels Auf Die Hydrologie Und Wasserwirtschaft in Österreich. Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, Wien, pp. 103–113.

Gabl, K., Lackinger, B., 1996. Lawinenhandbuch. Tyrolia Verlag, Innsbruck.

Gehrig-Fasel, J., Guisan, A., Zimmermann, N.E., 2007. Tree line shifts in the Swiss Alps: Climate change or land abandonment? Journal of Vegetation Science 18, 571–582. doi:10.1111/j.1654-1103.2007.tb02571.x

Gossow, H., Hafellner, R., Vacik, H., Huber, T., 2009. Major fire issues in the Euro-Alpine Region—the Austrian Alps. International Forest Fire News (IFFN) 38, 1–10.

Grace, J., Berninger, F., Nagy, L., 2002. Impacts of climate change on the tree Line. Ann Bot 90, 537–544. doi:10.1093/aob/mcf222

Gregory, K.J., Goudie, A.S., 2011. The SAGE handbook of geomorphology. Sage Publications Ltd.

Gruber, S., Haeberli, W., 2007. Permafrost in steep bedrock slopes and its temperature-related destabilization following climate change. Journal of Geophysical Research: Earth Surface 112. doi:10.1029/2006JF000547

Gruber, S., Hoelzle, M., Haeberli, W., 2004a. Permafrost thaw and destabilization of Alpine rock walls in the hot summer of 2003. Geophysical Research Letters 31. doi:10.1029/2004GL020051

Gruber, S., King, L., Kohl, T., Herz, T., Haeberli, W., Hoelzle, M., 2004b. Interpretation of geothermal profiles perturbed by topography: The Alpine permafrost boreholes at Stockhorn Plateau, Switzerland. Permafrost and Periglacial Processes 15, 349–357. doi:10.1002/ppp.503

Gruner, U., 2004. Klima und Sturzereignisse in Vergangenheit und Zukunft. Bulletin für angewandte Geologie 9, 23–37.

Gruner U., 2006: Bergstürze und Klima in den Alpen, gibt es Zusammenhänge? Bulletin für angewandte Geologie 11, 25–34.

Gruner, U., 2008. Klimatische und meteorologische Einflüsse auf Sturzprozesse, in: Interpraevent Conference Proceedings. Presented at the Interpraevent 2008, Dornbirn, Austria, pp. 147–158.

Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., Stark, C.P., 2007. Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. Meteorology and Atmospheric Physics 98, 239–267.

Habersack, H., Bürgel, J., Kanonier, A., 2009. FloodRisk II. Vertiefung und Vernetzung zukunftsweisender Umsetzungsstrategien zum integrierten Hochwassermanagement (Synthesebericht).

Habersack, H., Lalk, P., Gabriel, H., Haimann, M., Moser, M., Stephan, U., 2011. Daten - Bedarf und Qualität. In: BMLFUW, ÖWAV (Eds.), Fließgewässermodellierung - Arbeitsbehelf Feststofftransport Und Gewässermorphologie. Wien, pp. 71–77.

Haeberli, W., Hallet, B., Arenson, L., Elconin, R., Humlum, O., Kääb, A., Kaufmann, V., Ladanyi, B., Matsuoka, N., Springman, S., Mühll, D.V., 2006. Permafrost creep and rock glacier dynamics. Permafrost and Periglacial Processes 17, 189–214. doi:10.1002/ppp.561

Haeberli, W., Noetzli, J., Arenson, L., Delaloye, R., Gartner-Roer, I., Gruber, S., Isaksen, K., Kneisel, C., Krautblatter, M., Phillips, M., 2010. Mountain permafrost: development and challenges of a young research field. Journal of Glaciology 56, 1043–1058.

Hahn, F., 2004. Künstliche Beschneiung im Alpenraum – ein Hintergrundbericht. CIPRA Internationale Alpenschutzkommission, Schaan.

Hamann, C., 1988. Geomorphologische Karten zur Beurteilung der optischen Qualität von Landschaften, in: Embleton, C. (Ed.), Applied Geomorphological Mapping: Methodology by Example. Compiled by the Working Group on Geomorphological Survey and Mapping, Zeitschrift Für Geomorphologie, Supplementbände. pp. 125–141.

Hantel, M., Ehrendorfer, M., Haslinger, A., 2000. Climate sensitivity of snow cover duration in Austria. International Journal of Climatology 20, 615–640. doi:10.1002/(SICI)1097-0088(200005)20:6<615::AID-JOC489>3.0.CO;2-0

Harris, C., Arenson, L.U., Christiansen, H.H., Etzelmüller, B., Frauenfelder, R., Gruber, S., Haeberli, W., Hauck, C., Hölzle, M., Humlum, O., Isaksen, K., Kääb, A., Kern-Lütschg, M.A., Lenning, M., Matsuoka, N., Murton, J.B., Nötzli, J., Philipps, M., Ross, N., Seppälä, M., Springman, S., Mühll, V., 2009. Permafrost and climate in Europe: Monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses. Earth-Science Reviews 92, 117–171. doi:10.1016/j.earscirev.2008.12.002

Harris, C., Vonder Mühll, D., Isaksen, K., Haeberli, W., Sollid, J.L., King, L., Holmlund, P., Dramis, F., Guglielmin, M., Palacios, D., 2003. Warming permafrost in European mountains. Global and Planetary Change 39, 215–225. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2003.04.001

Hartmeyer, I., Keuschnig, M., Schrott, L., 2012a. A scale-oriented approach for the long-term monitoring of ground thermal conditions in permafrost-affected rock faces. Austrian Journal of Earth Sciences 105, 128–139.

Hartmeyer, I., Keuschnig, M., Schrott, L., 2012b. Long-term monitoring of permafrost-affected rock faces – A scale-oriented approach for the long-term monitoring of ground thermal conditions in permafrost-affected rock faces, Kitzsteinhorn, Hohe Tauern Range, Austria. Austrian Journal of Earth Sciences 105, 128–139.

Hartmeyer, I., Prasicek, G., Geilhausen, M., Schrott, L., 2007. A sediment budget of a sandur in the forefield of the Pasterze glacier (Upper Tauern, Austria). Geophysical Research Abstracts 9., 4th EGU General Assembly.

Harvey, S., Rhyner, H., Schweizer, J., 2012. Lawinenkunde: Praxiswissen für Einsteiger und Profis zu Gefahren, Risiken und Strategien, 2. Auflage. ed. Bruckmann.

Hassan, R., Millennium Ecosystem Assessment, Condition and Trends Working Group, 2005. Ecosystems and human well-being. Island press, Washington, D.C.

Hassan, R.M., Nhemachena, C., 2008. Determinants of African farmers' strategies for adapting to climate change: Multinomial choice analysis. African Journal of Agricultural and Resource Economics 02.

Henzinger, J., Poscher, G., Heissel, G., Mattle, B., 2009. Hangbewegungen Zintlwald, 3 Jahre nach dem Anbruch, in: Österreichische Geotechniktagung (Ed.), Tagungsbeiträge. Presented at the 7. Österreichische Geotechniktagung, Österreichischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Wien, p. 12.

Heumader, J., 2000. Die Katastrophenlawinen von Galtür und Valzur am 23. Und 24.2. 1999 im Paznauntal / Tirol. Presented at the Internationales Symposium Interpraevent 2000. Schutz des Lebensraumes vor Hochwasser, Muren und Lawinen, Interpraevent, pp. 397–409.

Hirschmugl, M., 2003. Debris flows in the mountain permafrost zone: Hohe Tauern national park (Austria), in: Philips, S., Springman, S.M., Arenson, L.U. (Eds.), Presented at the 8th International Conference on Permafrost, Swets & Zeitlinger, Zürich, Switzerland.

Hornich, R., Adelwöhrer, R., 2010. Landslides in Styria in 2009 / Hangrutschungsereignisse 2009 in der Steiermark. Geomechanics and Tunnelling 3, 455–461. doi:10.1002/geot.201000042

Hübl, J., Fuchs, S., Sitter, F., Totschnig, R., 2011a. Towards a frequency-magnitude relationship for torrent events in Austria, in: Genevois, R., Hamilton, D.L., Prestininzi, A. (Eds.), Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment: Proceedings of 5th International Conference: Padua, Italy, 14–17 June 2011. Presented at the 5th International Conference on debris-flow hazards mitigation: mechanics, prediction and assessment., Università La Sapienza, Padua, Italy.

Hübl, J., Hochschwarzer, M., Sereinig, N., Wöhrer-Alge, M. (Eds.), 2011b. Alpine Naturgefahren. Ein Handbuch für Praktiker. Wildbach- und Lawinenverbauung Sektion Vorarlberg.

Hug, D., 2012. Uncertainties in natural hazard risk management (Master Thesis). Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Würzburg.

Huggel, C., Clague, J.J., Korup, O., 2012a. Is climate change responsible for changing landslide activity in high mountains? Earth Surface Processes and Landforms 37, 77–91. doi:10.1002/esp.2223

Huggel, C., Khabarov, N., Korup, O., Obersteiner, M., 2012b. Physical impacts of climate change on landslide occurrence and related adaptation, in: Claque, J.J., Stead, D. (Eds.), Landslides: Types, Mechanisms and Modeling. Cambridge University Press, United Kingdom, pp. 121–134.

Jaboyedoff, M., Derron, M.H., Jakubowski, J., Oppikofer, T., Pedrazzini, A., 2012. The 2006 Eiger rockslide, European Alps. In Landslides: Types, Mechanisms and Modeling., in: Clague, J.J., Stead, D. (Eds.), Landslides: Types, Mechanisms and Modeling. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, pp. 282–296.

Jaesche, P., Veit, H., Huwe, B., 2003. Snow cover and soil moisture controls on solifluction in an area of seasonal frost, eastern Alps. Permafrost and Periglacial Processes 14, 399–410. doi:10.1002/ppp.471

Kaufmann, V., 2012. The evolution of rock glacier monitoring using terrestrial photogrammetry: the example of Äußeres Hochebenkar rock glacier (Austria). Austrian Journal of Earth Sciences 105, 63–67.

Kaufmann, V., Ladstädter, R., 2002. Spatio-temporal analysis of the dynamic behaviour of the Hochebenkar rock glaciers (Oetztal Alps, Austria) by means of digital photogrammetric methods. Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung 37, 119–140.

Kaufmann, V., Ladstädter, R., 2003. Quantitative analysis of rock glacier creep by means of digital photogrammetry using multitemporal aerial photographs: two case studies in the Austrian Alps., in: Philips, S., Springman, S.M., Arenson, L.U. (Eds.), Presented at the 8th International Conference on Permafrost, Swets & Zeitlinger, Zürich, Switzerland, pp. 525–530.

Kaufmann, V., Ladstädter, R., 2010. Documentation and visualization of the morphodynamics of Hinteres Langtalkar rock glacier (Hohe Tauern range, Austrian Alps) based on aerial photographs (1954–2006) and geodetic measurements (1999–2007). Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung 45, 103–116.

Kaufmann, V., Ladstädter, R., Kienast, G., 2007. 10 Years of monitoring of the Doesen Rock Glacier (Ankogel Group, Austria). A review of the research activities for the time period 1995–2005. Proceedings of the 5th Mountain Cartography Workshop of the Commission on Mountain Cartography of the ICA Bohinj, Slovenia, 29 March – 1 April 2006, 129–144.

Keiler, M., Kellerer-Pirklbauer, A., Otto, J.-C., 2012. Preface: Concepts and implications of environmental change and human impact: studies from Austrian geomorphological research. Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography 94, 1–5. doi:10.1111/j.1468-0459.2012.00457.x

Keiler, M., Knight, J., Harrison, S., 2010. Climate change and geomorphological hazards in the eastern European Alps. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 368, 2461–2479. doi:10.1098/rsta.2010.0047

Kellerer-Pirklbauer, A., Kaufmann, M., 2012. About the relationship between rock glacier velocity and climate parameters in central Austria. Austrian Journal of Earth Sciences 105, 94–112.

Kellerer-Pirklbauer, A., Lieb, K.G., Kleinferchner, H., 2012a. A new rock glacier inventory in the eastern European Alps. Austrian Journal of Earth Sciences 105, 78–93.

Kellerer-Pirklbauer, A., Lieb, G.K., Avian, M., Carrivick, J., 2012b. Climate change and rock fall events in high mountain areas: Numerous and extensive rock falls in 2007 at Mittlerer Burgstall, Central Austria. Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography 94, 59–78. doi:10.1111/j.1468-0459.2011.00449.x

Kern, K., Lieb, G.K., Seier, G., Kellerer-Pirklbauer, A., 2012. Modelling geomorphological hazards to assess the vulnerability of alpine infrastructure: The example of the Großglockner-Pasterze area, Austria. Austrian Journal of Earth Sciences 105, 113–127.

Kling, H., 2011. Auswirkungen verschiedener Szenarien der Klimaänderung auf den österreichischen Abschnitt der Donau (No. Endbericht K09DV0S00001_KlimaänderungDonau_v1.0).

Knoblauch, H., Badura, H., Schneider, J., 2006. Measurements of flow patterns within an Alpine reservoir, in: River Flow 2006. Presented at the River Flow 2006, Tay, Lisbon, Portugal, pp. 1601–1606.

Krähenbühl, R., 2004. Temperatur und Kluftwasser als Ursachen von Felssturz. Bulletin für angewandte Geologie 9, 19–35.

Krainer, K., 2007. Permafrost und Naturgefahren in Österreich. Ländlicher 1–18.

Krainer, K., He, X., 2006. Flow velocities of active rock glaciers in the Austrian Alps. Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography 88, 267–280. doi:10.1111/j.0435-3676.2006.00300.x

Krainer, K., Kellerer-Pirklbauer, A., Kaufmann, V., Lieb, G.K., Schrott, L., Hausmann, H., 2012. Permafrost Research in Austria: History and recent advances. Austrian Journal of Earth Sciences 105, 2–11.

Krainer, K., Ribis, M., 2012. A Rock Glacier Inventory of the Tyrolean Alps. Austrian Journal of Earth Sciences 105, 32–47.

Krautblatter, M., Funk, D., 2010. A rock / ice mechanical model for the destabilisation of permafrost rocks and first laboratory evidence for the „reduced friction hypothesis“, in: Proceedings of the 3rd European Conference on Permafrost (EUCOP III), 13–17 June 2010, Svalbard, Norway.

Krautblatter, M., Heißel, G., Moser, M., Nittel, P., Verleysdonk, S., 2009. Bliggferner–Tomographie einer Massenbewegung im Permafrostbereich zur Einschätzung des Gefährdungspotentials, 11, in: Tagungsband mit Kurzfassungen. Presented at the 11. Geoforum Umhausen, pp. 10–12.

Krautblatter, M., Huggel, C., Deline, P., Hasler, A., 2012. Research Perspectives on Unstable High-alpine Bedrock Permafrost: Measurement, Modelling and Process Understanding. Permafrost and Periglacial Processes 23, 80–88. doi:10.1002/ppp.740

Krumm, F., Kulakowski, D., Spiecker, H., Duc, P., Bebi, P., 2011. Stand development of Norway spruce dominated subalpine forests of the Swiss Alps. Forest Ecology and Management 262, 620–628.

Lan, H., Martin, C.D., Zhou, C., Lim, C.H., 2010. Rockfall hazard analysis using LiDAR and spatial modeling. Geomorphology 118, 213–223.

Länger, E., 1975. Bericht über die Katastrophenereignisse in Kärnten. Wildbach und Lawinenverbau 39.

Lardelli, C., Bebi, P., 2005. Veränderung von Lawinenschutzwäldern in der Landschaft Davos. Bündner Wald 58, 69–72.

Laternser, M., Schneebeli, M., 2002. Temporal Trend and Spatial Distribution of Avalanche Activity during the Last 50 Years in Switzerland. Natural Hazards 27, 201–230. doi:10.1023/A:1020327312719

Lieb, G.K., Kellerer-Pirklbauer, A., Strasser, U., 2012. Effekte des Klimawandels im Naturraum des Hochgebirges., in: Fassmann, H., Glade, T. (Eds.), Geographie für eine Welt im Wandel. V&R unipress, Göttingen, pp. 229–255.

Löw, S., Ebneter, F., Bremen, R., Herfort, M., Lützenkirchen, V., Matousek, F., 2007. Annual opening and closure of Alpine valleys. Felsbau—Rock and Soil Engineering 25.

Luino, F., 2005. Sequence of instability processes triggered by heavy rainfall in the northern Italy. Geomorphology 66, 13–39. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.09.010

Macfarlane, D.F., 2009. Observations and predictions of the behaviour of large, slow-moving landslides in schist, Clyde Dam reservoir, New Zealand. Engineering Geology 109, 5–15. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.02.005

Mair, R., Nairz, P., 2010. Lawine: die 10 entscheidenden Gefahrenmuster erkennen, Praxishandbuch. Tyrolia-Verlag, Innsbruck; Wien.

Marchi, L., Arattano, M., Deganutti, A.M., 2002. Ten years of debris-flow monitoring in the Moscardo Torrent (Italian Alps). Geomorphology 46, 1–17. doi:http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00162-3

Markart, G., Perzl, F., Klebinder, K., Kohl, B., Adams, M., Sotier, B., Stary, U., Strasser, M., Suntinger, K., 2012. Evaluation and quantification of possible impacts of climate change on hydrological characteristics of forests in the Waidhofen a.d. Ybbs region. Final

Report: CC-WaterS - Climate Change and Impacts on Water Supply. Bundesforschungszentrum für Wald, Vienna, Austria.

Marques, R., Zêzere, J., Trigo, R., Gaspar, J., Trigo, I., 2008. Rainfall patterns and critical values associated with landslides in Povoacao County (Sao Miguel Island, Azores): Relationships with the North Atlantic Oscillation. Hydrological Processes 22, 478–494. doi:10.1002/hyp.6879

Martin, E., Giraud, G., Lejeune, Y., Boudart, G., 2001. Impact of a climate change on avalanche hazard. Annals of Glaciology 32, 163–167. doi:10.3189/172756401781819292

Matsuura, S., Okamoto, T., Asano, S., Matsuyama, K., 2013. Characteristics of meltwater and / or rainfall regime in a snowy region and its effect on sediment-related disasters. Bulletin of Engineering Geology and the Environment 72, 119–129. doi:10.1007/s10064-012-0456-1

Mauser, W., Prasch, M., 2010. Klimawandel im Alpenraum – Ergebnisse von GLOWA-Danube, in: ÖWAV (Ed.), Auswirkungen Des Klimawandels Auf Die Hydrologie Und Wasserwirtschaft in Österreich. Präsentation Der Aktuellen Studien. Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, Wien, pp. 89–100.

McClung, D., Schaerer, P., 1993. The avalanche handbook. Mountaineers Books, Seattle.

McVicar, T.R., Roderick, M.L., Donohue, R.J., Li, L.T., Van Niel, T.G., Thomas, A., Grieser, J., Jhajharia, D., Himri, Y., Mahowald, N.M., Mescherskaya, A.V., Kruger, A.C., Rehman, S., Dinpashoh, Y., 2012. Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: Implications for evaporation. Journal of Hydrology 416–417, 182–205. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.10.024

Melchiorre, C., Frattini, P., 2012. Modelling probability of rainfall-induced shallow landslides in a changing climate, Otta, Central Norway. Climatic change 113, 413–436. doi:10.1007/s10584-011-0325-0

Mendez, M.J., Buschiazzo, D.E., 2010. Wind erosion risk in agricultural soils under different tillage systems in the semiarid Pampas of Argentina. Soil and Tillage Research 106, 311–316. doi:10.1016/j.still.2009.10.010

Messerli, B., Grosjean, M., Hofer, T., Nunez, L., Pfister, C., 2000. From nature-dominated to human-dominated environmental changes. Quaternary Science Reviews 19, 459–479.

Mohnl, H., 1991. Fluctuations of snow parameters in the mountainous region of Austria within the last 90 years. Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich 65, 264–268.

Moser, M., 1980. Zur Analyse von Hangbewegungen in schwachbindigen bis rolligen Lockergesteinen im alpinen Raum anlässlich von Starkniederschlägen. International Symposium Interpraevent 1980, Hochwasser-Abwehr, Bad Ischl 1, 121–148.

Mrkvicka, A., Schneider, P., 2005. „Grüne Wende?“ Naturschutz im Jahrhundertwende-Wien. In: Brunner, K. und P. Schneider (Hrsg):, in: Brunner, K., Schneider, P. (Eds.), Umwelt Stadt. Geschichte Des Natur- Und Lebensraumes Wien, Wiener Umweltstudien. Wien.

Munich Re, 2003. Topics annual review: natural catastrophes 2002.

Murton, J.B., Coutard, J.-P., Lautridou, J.-P., Ozouf, J.-C., Robinson, D.A., Williams, R.B.G., 2001. Physical modelling of bedrock brecciation by ice segregation in permafrost. Permafrost and Periglacial Processes 12, 255–266. doi:10.1002/ppp.390

Nachtnebel, H.P., Stanzel, P., 2010. Auswirkungen von möglichen Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt und Extremwerte, in: ÖWAV (Ed.), Auswirkungen Des Klimawandels Auf Die Hydrologie Und Wasserwirtschaft in Österreich. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, pp. 115–128.

Nationalpark Hohe Tauern, 2014. Nationalpark Hohe Tauern website [WWW Document]. URL http://www.hohetauern.at/de/

Neumeister, H., 1988. Geoökologie: geowissenschaftliche Aspekte der Ökologie. Fischer, Jena.

Nötzli, J., Gruber, S., Hoelzle, M., 2004. Permafrost und Felsstürze im Hitzesommer 2003. GEOforum actuel 20, 11–14.

ÖN B 2400, n.d. Hydrologie–Hydrographische Fachausdrücke und Zeichen–Ergänzende Bestimmungen zur ÖNORM EN ISO 772, Österreichisches Normungsinstitut.

ONR 24800, 2009. Schutzbauwerke der Wildbachverbauung – Begriffe und ihre Definitionen sowie Klassifizierung.

Otto, J.-C., Keuschnig, M., Götz, J., Marbach, M., Schrott, L., 2012. Detection of Mountain Permafrost by Combining High Resolution Surface and Subsurface Information – an Example from the Glatzbach Catchment, Austrian Alps. Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography 94, 43–57. doi:10.1111/j.1468-0459.2012.00455.x

Otto, J.-C., Schrott, L. (Eds.), 2010. Quantifizierung von rezenten und postglazialen Sedimentflüssen in den Ostalpen, Salzburger Geografische Nachrichten. Selbstverlag des Fachbereichs Geographie und Geologie der Universität Salzburg, Salzburg.

Perret, S., Stoffel, M., Kienholz, H., 2006. Spatial and temporal rockfall activity in a forest stand in the Swiss Prealps—a dendrogeomorphological case study. Geomorphology 74, 219–231. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.08.009

Perzl, F., Maier, B., Walter, D., 2012. Klimawandel, Naturgefahren und Schutzwald. BFW Praxisinformation, Adaptives Managment angesichts eines Klimawandels 30, 24.

Perzl, F., Walter, D., 2012. Die Lawinen-Schutzwirkung des Waldes im Klimawandel, AlpineSPACE Project / MANFRED Report. Bundesforschungszentrum für Wald. Institut für Naturgefahren, Innsbruck.

Peticzka, R., Riegler, D., Ottner, F., 2010. New Results from the „Stillfried B“ Profile, in: Neugebauer-Maresch, C., Owen, L.R. (Eds.), New Aspects of the Central and Eastern European Upper Palaeolithic – Methods, Chronology, Technology and Subsistence, Mitteilungen Des Prähistorischen Kommission. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, pp. 199–207.

Pezzatti, G.B., Bajocco, S., Torriani, D., Conedera, M., 2009. Selective burning of forest vegetation in Canton Ticino (southern Switzerland). Plant Biosystems – An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology 143, 609–620. doi:10.1080/11263500903233292

Pfitscher, A., 1996. Wasserkatastrophen im Martelltal. Der 24. / 25. August 1987. Herausgegeben von der Gemeinde Martell.

Phillips, J.D., 2003. Sources of nonlinearity and complexity in geomorphic systems. Progress in Physical Geography 27, 1–23. doi:10.1191/0309133303pp340ra

Pierson, T., Costa, J.E., 1987. A rheologic classification of subaerial sediment-water flows, in: Costa, J.E., Wiezcorek, G.F. (Eds.), Debris Flows / Avalanched: Process, Recognition, and Mitigation, Reviews in Engineering Geology. Geological Society of America.

Pillewizer, W., 1938. Photogrammetrische Gletscheruntersuchungen im Sommer 1938. Zeitschrift der Gesellschaft für Erdkunde 9, 367–372.

Pillewizer, W., 1957. Untersuchungen an Blockströmen der ötztaler Alpen. Geomorphologische Abhandlungen des Geographischen Institutes der FU Berlin (Otto-Maull-Festschrift) 5, 37–50.

Pindur, P., Zwerger, P., Luzian, R., Stern, R., 2007. Die Vegetationskartierung im Zemmgrund aus den 1950er Jahren – Grundlage für aktuelle Vergleichsstudien. Ein Ergebnis der Vegetationskartierung von Helmut Friedel in den Zillertaler Alpen, in: Pindur, R., Luzian, R. (Eds.), Prähistorische Lawinen: Nachweis Und Analyse Holozäner Lawinenereignisse in Den Zillertaler Alpen, Österreich; Der Blick Zurück Als Schlüssel Für Die Zukunft, BFW Berichte. ÖAW, Wien.

Prager, C., Zangerl, C., Patzelt, G., Brandner, R., 2008. Age distribution of fossil landslides in the Tyrol (Austria) and its surrounding areas. Natural Hazards and Earth System Sciences 8, 377–407.

Prettenthaler, F., Amrusch, P., Habsburg-Lothringen, C., 2010. Estimation of an absolute flood damage curve based on an Austrian case study under a dam breach scenario. Natural Hazards and Earth System Science 10, 881–894. doi:10.5194/nhess-10-881-2010

Raymond Pralong,, M., Turowski, J.M., Beer, A., Rickenmann, D., Métraux, V., Glassey, T., 2011. Klimaänderung und Wasserkraft. Sektorielle Studie Wallis. Modul D. Auswirkungen der Klimaänderung auf die Geschiebefracht. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Sion und Birmensdorf.

Rickli, C., Zürcher, K., Frey, W., Lüscher, P., 2002. Wirkungen des Waldes auf oberflächennahe Rutschprozesse. Schweizerische Zeitschrift fur Forstwesen 153, 437–445.

Sailer, R., Bollmann, E., Hoinkes, S., Rieg, L., Spross, M., Stötter, J., 2012. Quantification of geomorphodynamics in glaciated and recently deglaciated terrain based on airborne laser scanning data. Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography 94, 17–32. doi:10.1111/j.1468-0459.2012.00456.x

Sass, O., 2005. Temporal variability of rockfall in the Bavarian Alps, Germany. Arctic, Antarctic, and Alpine Research 37, 564–573. doi:http://dx.doi.org/10.1657/1523-0430(2005)037[0564:TVORIT]2.0.CO;2

Sass, O., 2010. Spatial and temporal patterns of talus activity–a lichenometric approach in the Stubaier Alps, Austria. Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography 92, 375–391. doi:10.1111/j.1468-0459.2010.00402.x

Sass, O., Heel, M., Hoinkis, R., Wetzel, K.-F., 2010. A six-year record of debris transport by avalanches on a wildfire slope (Arnspitze, Tyrol). Zeitschrift für Geomorphologie 54, 181–193. doi:10.1127/0372-8854/2010/0054-0009

Sass, O., Heel, M., Leistner, I., Stöger, F., Wetzel, K.-F., Friedmann, A., 2012. Disturbance, geomorphic processes and recovery of wildfire slopes in North Tyrol. Earth Surface Processes and Landforms 37, 883–894. doi:10.1002/esp.3221

Sass, O., Oberlechner, M., 2012. Is climate change causing increased rockfall frequency in Austria? Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 12, 3209–3216. doi:10.5194/nhess-12-3209-2012

Sass, O., Vacik, A., Arpaci, A., Malowerschnig, B., Formayer, H., Sailer, R., 2012. The FIRIA project: Towards assessing future wildfire hazard in Austria. Presented at the 13. Österreichischer Klimatag, Universität für Bodenkultur, Wien.

Sattler, K., Keiler, M., Zischg, A., Schrott, L., 2011. On the Connection between Debris Flow Activity and Permafrost Degradation: A Case Study from the Schnalstal, South Tyrolean Alps, Italy. Permafrost and Periglacial Processes 22, 254–265. doi:10.1002/ppp.730

Schädler, B., 2010. Hydrologische Veränderungen und Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft in der Schweiz, in: ÖWAV (Ed.), Auswirkungen Des Klimawandels Auf Die Hydrologie Und Wasserwirtschaft in Österreich. Präsentation Der Aktuellen Studien. Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, Wien, pp. 73–88.

Schädler, B., Frei, C., Grebner, D., Willi, H.-P., 2007. Grundlagen zum Klima. Wasser Energie Luft 99, 58–60.

Schleiss, A., De Cesare, G., Althaus, D., 2010. Verlandung der Stauseen gefährdet die nachhaltige Nutzung der Wasserkraft. Wasser Energie Luft 102, 31–40.

Schmuck, G., San-Miguel-Ayanz, J., Camia, A., Durrant, T., Santos de Oliveira, S., Boca, R., Whitmore, J., Giovando, C., Libertà, G., Corti, P., Schulte, E., 2011. Forest Fires in Europe 2010. JRC Scientific and Technical Reports (No. 11), Scientific and Technical Reports. Joint Research Center, European Commission; Institute for Environment and Sustainability.

Schneider, B., Schneider, H., 2001. Zur sechzigjährigen Messreihe der kurzfristigen Geschwindigkeitsschwankungen am Blockgletscher im Außeren Hochebenkar, Ötztaler Alpen. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie 37, 1–33.

Schöner, W., Auer, I., Böhm, R., 2009. Long term trend of snow depth at Sonnblick (Austrian Alps) and its relation to climate change. Hydrological Processes 23, 1052–1063. doi:10.1002/hyp.7209

Schöner, W., Böckli, L., Hausmann, H., Otto, J.C., Reisenhofer, S., Riedl, C., Seren, S., 2012. Spatial Patterns of Permafrost at Hoher Sonnblick (Austrian Alps) – Extensive Field-Measurements and Modelling Approaches. Austrian Journal of Earth Sciences 105, 154–168.

Schöner, W., Böhm, R., Haslinger, K., 2011. Klimaänderung in Österreich – hydrologisch relevante Klimaelemente. Österr Wasser- und Abfallw 63, 11–20. doi:10.1007/s00506-010-0271-5

Schrott, L., Otto, J.-C., 2012. Modelling alpine permafrost distribution in the Hohe Tauern region, Austria. Austrian Journal of Earth Sciences 105, 196–183.

Schrott, L., Otto, J.-C., Keller, F., 2012a. Modelling alpine permafrost distribution in the Hohe Tauern region, Austria. Austrian Journal of Earth Sciences 105, 169–183.

Schrott, L., Otto, J.C., Keller, F., Rosner, M.L., 2012b. Permafrost in den Hohen Tauern (Abschlussbericht des permalp.at Projektes). Universität Salzburg, unveröffentlicht.

Schweigl, J., Hervas, J., 2009. Landslide Mapping in Austria (JRC Scientific and Technical Reports No. EUR 23785 EN). Institute for Environment and Sustainability, Joint Research Centre, European Commission, Ispra, Italy.

Sendzik, W., 2003. Fraktionioerung von Geschiebetransportarten in morphodynamisch-numerischen Modellen (Diplom). Universität Hannover, Hannover.

Shakesby, R.A., Doerr, S.H., 2006. Wildfire as a hydrological and geomorphological agent. Earth-Science Reviews 74, 269–307. doi:10.1016/j.earscirev.2005.10.006

Slaymaker, O., Spencer, T., Embleton-Hamann, C. (Eds.), 2009. Geomorphology and Global Environmental Change. Cambridge University Press.

Soja, G., Burger, E., Dockner, V., Gerzabek, M., Grünberger, S., Hackl, K., Haslinger, J., Hofmann, R., Kühnen, L., Mehofer, M., Omann, I., Rampazzo Todorovic, G., Rodriguez-Pascual, R., Schildberger, B., Vogl, K., Zehetner, F., 2010. Weinbau im Klimawandel: Anpassungs- und Mitigationsmöglichkeiten am Beispiel der Modellregion Traisental (WEINKLIM) (Abschlussbericht No. Forschungsprojekt Nr. 100416). Austrian Institute of Technology - AIT, Seibersdorf.

Stepanek, L., Kohl, B., Pirkl, H., Perzl, F., Markart, G., Klebinder, K., Riedl, F., 2009. Hochwasser Paznaun 2005: Wald – Abfluss –

Potentiale (Bericht der Wildbach- und Lawinenverbauung, die. wildbach). Lebensminsterium, Land Tirol, BFW, Wien.

Stingl, H., Garleff, K., Höfner, T., Huwe, B., Jaesche, P., John, B., Veit, H., 2010. Grundfragen des alpinen Periglazials – Ergebnisse, Probleme und Perspektiven periglazialmorphologischer Untersuchungen im Langzeitprojekt „Glorer Hütte“ in der Südlichen Glockner- / Nördlichen Schobergruppe (Südliche Hohe Tauern, Osttirol)., in: Otto, J.-C., Schrott, L. (Eds.), Quantifizierung von Rezenten Und Postglazialen Sedimentflüssen in Den Ostalpen., Salzburger Geographische Arbeiten. Salzburg, pp. 15–42.

Stoffel, M., 2010. Magnitude–frequency relationships of debris flows — A case study based on field surveys and tree-ring records. Geomorphology 116, 67–76. doi:10.1016/j.geomorph.2009.10.009

Stoffel, M., Bollschweiler, M., Beniston, M., 2011. Rainfall characteristics for periglacial debris flows in the Swiss Alps: past incidences–potential future evolutions. Climatic Change 105, 263–280. doi:10.1007/s10584-011-0036-6

Stoffel, M., Huggel, C., 2012. Effects of climate change on mass movements in mountain environments. Progress in Physical Geography 36, 421–439. doi:10.1177/0309133312441010

Stötter, J., Meißl, G., Rinderer, M., Keiler, M., Fuchs, S., 2002. Galtür – Eine Gemeinde im Zeichen des Lawinenereignisses von 1999, in: Steinicke, E. (Ed.), Geographischer Exkursionsführer. Europaregion Tirol – Südtirol – Trentino, Spezialexkursionen Im Bundesland Tirol (Innsbrucker Geographische Studien 33 / 2). Innsbruck, pp. 167–184.

Strunk, H., 1986. Der Einfluß langsamer Massenbewegungen auf das Sanftrelief der südlichen Zentralalpen., in: Klug, H. (Ed.), Geomorphologie Der Periglazialgebiete, Zeitschrift Für Geomorphologie N. F., Supplementbände. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, pp. 77–88.

Stützer, A., 2002. Zwischen subalpinem Wald und alpiner Tundra. Eine Studie zu Struktur und Dynamik der Fichten-Waldgrenze auf der Saualpe (Kärnten). Wulfenia – Mitteilungen des Kärntner Botanikzentrums Klagenfurt 9, 89–104.

Teich, M., Marty, C., Gollut, C., Grêt-Regamey, A., Bebi, P., 2012. Snow and weather conditions associated with avalanche releases in forests: Rare situations with decreasing trends during the last 41years. Cold Regions Science and Technology 83–84, 77–88. doi:10.1016/j.coldregions.2012.06.007

Tilch, N., 2009. Gravitative Massenbewegungen in der Katastrophenregion Klingfurth (Walpersbach, Südliches Niederösterreich) im Juni 2009 – Erkundungsergebnisse und eine erste Abschätzung des rutschungsinduzierten Gefahrenpotentials.

Tilch, N., Hagen, K., Aust, G., Fromm, R., Herzeberger, E., Klebinder, K., Perl, F., Proske, H., Bauer, C., Kornberger, B., Kleb, U., Granica, K., Pistotnik, G., Haiden, T., 2011. Modelling of Landslide Susceptibility and affected Areas – Process-specific Validation of Databases, Methods and Results for the Communities of Gasen and Haslau (AdaptSlide) (Endreport). Austrian Federal Ministry for Agriculture, Forestry, Environment and Water Management (BMLFUW), Vienna.

Totschnig, R., Sedlacek, W., Fuchs, S., 2011. A quantitative vulnerability function for fluvial sediment transport. Natural Hazards 58, 681–703. doi:10.1007/s11069-010-9623-5

Turner, A.K., Schuster, R.L., 1996. Landslides: Investigation and Mitigation. National Academy Press.

Vacik, H., 2012. Die Waldbrandsituation in Österreich 2002–2011.

Vacik, H., Arndt, N., Arpaci, A., Koch, V., Mueller, M., Gossow, H., 2011. Characterisation of forest fires in Austria. Austrian Journal of Forest Science 128, 1–31.

Van Beek, L.P.H., 2002. Assessment of the influence of changes in land use and climate on landslide activity in a Mediterranean environment (Dissertation). Universiteit Utrecht, Utrecht.

Van den Berg, A.E., Koole, S.L., van der Wulp, N.Y., 2003. Environmental preference and restoration: (How) are they related? Journal of Environmental Psychology 23, 135–146. doi:10.1016/S0272-4944(02)00111-1

Veit, H., 2002. Die Alpen: Geoökologie und Landschaftsentwicklung. UTB, Stuttgart (Hohenheim).

Veit, H., Höfner, T., 1993. Permafrost, gelifluction and fluvial sediment transfer in the alpine / subnival ecotone, central Alps, Austria: Present, past and future, in: Barsch, D., Mäusbacher, R., Deutscher Arbeitskreis für Geomorphologie (Eds.), Some Contributions to the Study of Landforms and Geomorphic Processes, Zeitschrift Für Geomorphologie NF, Suppl.-Bd. pp. 71–84.

Vietoris, L., 1958. Der Blockgletscher des äußeren Hochebenkares. Gurgler Berichte 1, 41–45.

Vietoris, L., 1972. Über die Blockgletscher des Äußeren Hochebenkars. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie 8, 169–188.

Vischer, D., Huber, A., 1993. Wasserbau: Hydrologische Grundlagen, Elemente Des Wasserbaus, Nutz- und Schutzbauten an Binnengewässern. Springer-Lehrbuch.

Voigt, T., Füssel, H.-M., Gärtner-Roer, I., Huggel, C., Marty, C., Zemp, M., 2010. Impacts of climate change on snow, ice, and permafrost in Europe: Observed trends, future projections, and socio-economic relevance ETC / ACC Technical Paper 2010 / 13 (Technical Paper No. ETC / ACC Technical Paper 2010 / 13). European Topic Centre on Air and Climate Change, Netherl.

Wasem, U., Hester, C., Wohlgemuth, T., 2010. Waldverjüngung nach Feuer. Wald und Holz 91, 42–45.

Webb, N.P., Strong, C.L., 2011. Soil erodibility dynamics and its representation for wind erosion and dust emission models. Aeolian Research 3, 165–179. doi:10.1016/j.aeolia.2011.03.002

Whalley, W.B., 1984. Rockfalls, in: Brunsden, D., Prior, D.B. (Eds.), Slope Instability. Wiley, London, pp. 217–256.

Wimmer, A., 2009. Die Klimaänderung (in) der Wachau: Die Klimaänderung der Wachauer Winzer (Diplomarbeit). Diplomica Verlag, Hamburg.

Wohlgemuth, T., Duelli, P., Ginzler, C., Gödickemeier, I., Hadorn, S., Hagedorn, F., Küttel, P., Lüscher, P., Moretti, M., Schneiter, G., Sciacca, S., Wermelinger, B., 2005. Ökologische Resilienz nach Feuer: Die Waldbrandfläche Leuk als Modellfall | Ecological resilience after fire: the forest fire area above Leuk as a model case study. Schweizerische Zeitschrift fur Forstwesen 156, 345–352. doi:10.3188/szf.2005.0345

Xia, M., Ren, G.M., Ma, X.L., 2013. Deformation and mechanism of landslide influenced by the effects of reservoir water and rainfall, Three Gorges, China. Natural Hazards 68, 467–482. doi:10.1007/s11069-013-0634-x

ZAMG, 2013. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik [WWW Document]. Klimadaten von Österreich 1971–2000. URL http://www.zamg.ac.at/fix/klima/oe71-00/klima2000/klimadaten_oesterreich_1971_frame1.htm (accessed 5.2.13).

Zangerl, C., Eberhardt, E., Perzlmaier, S., 2010. Kinematic behaviour and velocity characteristics of a complex deep-seated crystalline rockslide system in relation to its interaction with a dam reservoir. Engineering Geology 112, 53–67. doi:10.1016/j.enggeo.2010.01.001

Zangerl, C., Engel, D., 2009. Entwicklung kinematischer Modelle von Massenbewegungen auf Basis von Deformationsmes-

sungen, in: Marschallinger, R. (Ed.), Online-Datenerfassung, berührungslose Messverfahren, 3D-Modellierung und geotechnische Analyse in Geologie und Geotechnik: Beiträge zur COG-Fachtagung, Salzburg 2009. Wichmann, Heidelberg, pp. 48–55.

Zangerl, C., Prager, C., Chwatal, W., Brückl, E., Kirschner, H., Brandner, R., 2012. Kinematics and internal deformation of a deep-seated slow rock slide in metamorphic rock (Niedergallmigg, Austria), in: Eberhardt, E.B., Froese, C., Turner, K., Leroueil, S. (Eds.), Landslides and Engineered Slopes: Protecting Society through Improved Understanding: Proceedings of the 11th International and 2nd North American Symposium on Landslides and Engineered Slopes, Banff, Canada, 3–8 June 2012. CRC Press, Leiden.

Zêzere, J.L., Trigo, R.M., Trigo, I.F., 2005. Shallow and deep landslides induced by rainfall in the Lisbon region (Portugal): assessment of relationships with the North Atlantic Oscillation. Natural Hazards and Earth System Science 5, 331–344.

Zhao, W., Tian, Y., Wu, L., Liu, Y., 2010. Human impact index in landslide susceptibility mapping. Presented at the 2010 18th International Conference on Geoinformatics, IEEE, pp. 1–6. doi:10.1109/GEOINFORMATICS.2010.5567817

Zimmermann, M., 2013. Hazard assessment, in: Dating Torrential Processes on Fans and Cones, Advances in Global Change Research. Springer, pp. 343–353.

Zimmermann, M., Mani, P., Gamma, P., 1997. Murganggefahr und Klimaänderung: ein GIS-basierter Ansatz. vdf Hochschulverlag AG.

Zimmermann, N., Bolliger, J., Gehrig-Fasel, J., Guisan, A., Kienast, F., Lischke, H., Rickebusch, S., Wohlgemuth, T., 2006. Wo wachsen die Bäume in 100 Jahren? Forum für Wissen 63, 63–71.

Band 2 Kapitel 5: Der Einfluss des Klimawandels auf die Pedosphäre
Volume 2 Chapter 5: Climate Change Impact on the Pedosphere

Koordinierende Leitautoren
Andreas Baumgarten, Clemens Geitner

LeitautorInnen
Hans-Peter Haslmayr, Sophie Zechmeister-Boltenstern

Beiträe von
Andreas Bohner, Winfried E.H. Blum, Georg Dersch, Michael Englisch, Alexandra Freudenschuss, Sigbert Huber, Paul Illmer, Robert Jandl, Klaus Katzensteiner, Barbara Kitzler, Andreas Klik, Rosa Margesin, Gerhard Markart, Erwin Murer, Heide Spiegel, Dieter Stöhr, Peter Strauss, Walter Wenzel

Für den Begutachtungsprozess
Martin Gerzabek

Inhalt

ZUSAMMENFASSUNG

Dieses Kapitel befasst sich mit dem Einfluss des Klimawandels auf die Pedosphäre, d.h. auf Böden. Diese stellen nicht nur einen elementaren Bestandteil der Ökosysteme dar, sie bilden auch die Grundlage für die landwirtschaftliche Produktion und somit auch für die Ernährungssicherheit. Böden beeinflussen darüber hinaus wesentlich die globale Kohlenstoffbilanz. Der Anteil an Kohlendioxid (CO_2), der jährlich aus den Böden in die Atmosphäre gelangt (und ebenso von ihnen wieder aufgenommen wird), übersteigt jenen aus fossilen Brennstoffen bei weitem. Umso wichtiger ist es, das ökologische Gleichgewicht der Böden zu erhalten. Sicher ist, dass die biotische Komponente des Bodens, verglichen mit chemischen oder physikalischen Eigenschaften, am raschesten und deutlichsten auf Klimaveränderungen reagiert, was Folgen für die Ökosystemleistungen des Bodens hat. Dies betrifft vor allem mikrobiologische Prozesse, die die Menge und Qualität der organischen Substanz und damit die Erhaltung des großen Kohlenstoffspeichers im Boden steuern. Viele Prozesse im Boden sind sowohl temperatur- als auch feuchtigkeitsabhängig. Da das zukünftige Zusammenspiel dieser beiden Klimafaktoren in Österreich räumlich stark variieren wird, sind regional und lokal sehr unterschiedliche Folgewirkungen auf den Boden und seine Ökosystemleistungen zu erwarten. In Österreich ist die Datenlage über die Böden und ihre räumliche Verteilung vergleichsweise gut. Die Wechselbeziehungen zwischen Boden und Vegetation sind von besonderer Relevanz, da die Vegetation wesentlich rascher auf Klimaänderungen reagiert und ihrerseits die Bodenentwicklung mitbestimmt. Das kontinuierliche Monitoring von Böden ist zwar aufwendig, muss aber für die Zukunft als unerlässlich angesehen werden, um jene Prozesse im Boden beobachten und differenzierter nachbilden zu können, die im Hinblick auf den Klimawandel bedeutend sind. Böden sind durch anthropogene Eingriffe zahlreichen Belastungen (z.B. durch Bodenbearbeitung, Entwässerung, Baumaßnahmen) ausgesetzt, die zunächst mit Klima anscheinend nur wenig zu tun haben. Diese Grundbelastungen können jedoch klimabedingte Veränderungen im Boden verschärfen, insbesondere wenn Böden stark degradiert sind oder gar durch Versiegelung kaum mehr natürliche Leistungen erbringen können. Insofern muss Bodenschutz auch als Klimaschutz verstanden werden.

SUMMARY

This chapter focuses on the impacts of climate change on the pedosphere, i.e., on soils. In addition to their role as a primary component of ecosystems, soils constitute the basis of agricultural production and ultimately food security. Soils have a major effect on the global carbon budget. The annual release (and uptake) of carbon dioxide (CO_2) from soils largely exceed those emissions due to fossil fuel combustion, making it crucial to preserve the ecological balance of soils. The biotic component of soils is very sensitive to climate change, which in turn has important implications on ecosystem services. Soil micro-biota control the processes responsible for the amount and quality of soil organic matter and accordingly for the maintenance of the huge carbon storage pool of soils. Many soil processes are temperature and moisture dependent. In Austria, the future interactions of these two climate factors have high spatial variation, and therefore the consequences of climate change on soils and their ecosystem services are expected to vary both locally and regionally. In Austria, an extensive dataset on soils and their spatial distribution is available. For the assessment of climate change impacts, the relationships between soils and vegetation are of paramount importance, as vegetation reacts quickly to climate change with implications on soil development. The continuous monitoring of soils, though labour intensive, is essential in order to observe and reconstruct relevant processes with respect to climate change. Soils are exposed to several anthropogenic threats, which at first glance have little to do with climate. However, these basic stresses may exacerbate climate change effects on soils, particularly if soils cannot sustain their ecosystem services due to soil degradation or soil sealing. In this respect, soil protection is an important component of climate change measures.

KERNAUSSAGEN

- Der Klimawandel ist für den Boden relevant – und umgekehrt.

Durch die Kenntnis der in den Böden ablaufenden Prozesse ist es zweifelsfrei, dass diese auf Klimaänderungen reagieren (sehr wahrscheinlich). Diese Tatsache wird allerdings kaum in der Diskussion berücksichtigt, was unter anderem damit zusammenhängt, dass die meisten Reaktionen in Böden eher langfristig ausfallen und noch zu wenig erforscht sind. Da die weltweiten Landflächen mit ihren Böden um ein Vielfaches mehr an CO_2 an die Atmosphäre abgeben (und etwa ebenso viel wieder aufnehmen) als die anthropogene Verbrennung fossiler Energieträger, sind die Rückkopplungseffekte in Böden von besonderer Bedeutung. Insbesondere Moorböden sind große Kohlenstoffspeicher und reagieren empfindlich auf höhere Temperaturen (sehr wahrscheinlich).

- Der Klimawandel verändert den Bodenwasserhaushalt.

Bei zunehmender Verdunstung und gleichbleibenden bzw. regional abnehmenden Niederschlagsmengen wird es im Osten Österreichs zu abnehmenden Sickerwassermengen und zu einem Absinken des Grundwasserspiegels kommen. Dadurch werden Böden, die unter Grund- oder Stauwassereinfluss stehen (Gleye und Pseudogleye), flächenhaft weniger werden (sehr wahrscheinlich). Auf Böden mit geringer Wasserspeicherfähigkeit sind durch Trockenstress Ertragseinbußen bei land- und forstwirtschaftlicher Nutzung zu erwarten (sehr wahrscheinlich). Durch die Zunahme von Starkniederschlagsereignissen kommt es zu erhöhtem Oberflächenabfluss und damit zu Bodenverlusten durch Bodenerosion (wahrscheinlich). Durch die Zunahme von Bodenverdichtungen werden diese Prozesse weiter verstärkt (sehr wahrscheinlich).

- Der Klimawandel verändert das Leben im und auf dem Boden.

Eine Erhöhung der Luft- und Bodentemperaturen wird die Pflanzengemeinschaft und das Wurzelwachstum eines Standorts und infolgedessen die Gemeinschaftsstruktur der Bodenlebewesen verändern (wahrscheinlich). Trockene Böden weisen dabei eine geringere Diversität und weniger robuste Populationen auf als feuchtere aber gut belüftete Böden.

- Der Klimawandel verändert die organische Substanz.

Temperatur- und Wasserregime steuern Abbau- und Umsatzprozesse der organischen Substanz, sodass Reaktionen auf den Klimawandel zu erwarten sind (sehr wahrscheinlich). In Abhängigkeit vom Standort kann die Reaktion aber sehr unterschiedlich ausfallen. Generell werden durch eine erhöhte Temperatur – zumindest bei gleichbleibender Feuchte – die Mineralisationsprozesse im Boden beschleunigt und folglich die organische Bodensubstanz verstärkt abgebaut (sehr wahrscheinlich). Dies hat neben den Folgen der dadurch gesteigerten Treibhausgasemissionen (Lachgas [N_2O], Methan [CH_4] und Kohlenstoffdioxid [CO_2]) auch negative Auswirkungen auf die Bodenfruchtbarkeit und andere Bodenfunktionen. Ob und inwieweit diese Humusverluste durch eine erhöhte Biomasseproduktion (durch erhöhtes CO_2-Angebot und längere Vegetationszeiten) ausgeglichen werden, ist von Standort und Nutzung abhängig und kann noch kaum abgeschätzt werden (etwa so wahrscheinlich wie nicht). Durch das verstärkte Auftauen von Permafrostböden bzw. den Rückzug des Permafrostes im Hochgebirge kann im Permafrost konservierte organische Substanz von Bodenmikroorganismen abgebaut werden, was zu einer zusätzlichen Freisetzung von Methan und CO_2 führt (wahrscheinlich).

- Der Klimawandel verändert den Stoffhaushalt.

Mit steigenden Temperaturen wird die Verwitterungsrate der Ausgangssubstrate zunehmen, wenn ausreichend Feuchtigkeit vorhanden ist. Dadurch wird es zu Veränderungen im Bodennährstoffhaushalt kommen (wahrscheinlich). Eine Zunahme von Temperaturextremen und Trockenphasen beeinflusst die Umsatzraten von z. B. Kohlenstoff (C) und Stickstoff (N) (sehr wahrscheinlich). Bei stärker ausgeprägten Gefrier- und Auftauprozessen im Winter (durch Veränderung der Schneedeckendauer und -mächtigkeit), aber auch bei starkem und langem Austrocknen des Bodens, gefolgt von Starkniederschlagsereignissen, steigen die Umsetzungsraten von Kohlenstoff und Stickstoff, und es kommt unmittelbar danach zu Emissionsmaxima von Treibhausgasen (wahrscheinlich).

- Der Klimawandel verändert die Ertragsfähigkeit.

Eine Erhöhung der Lufttemperatur und eine Verlängerung der Vegetationsperiode kann in kühleren und niederschlagsreicheren Gebieten das Ertragspotential steigern, während in niederschlagsärmeren Gebieten das Ertragspotential aufgrund der Zunahme von Trocken- und Hitzestress sinken wird (sehr wahrscheinlich).

- Waldböden sind empfindlich gegenüber Störungen.

Bei einer Temperaturerhöhung um 1 °C wird etwa 10 % mehr CO_2 durch Bodenatmung freigesetzt, bei 2 °C werden etwa 20 % mehr CO_2 und N_2O emittiert (wahrscheinlich). Die Stickstoffdeposition hat infolge erhöhter Bildung von Nadel-/Blattmasse einen wesentlichen Einfluss auf die Bodenkohlenstoffspeicher (wahrscheinlich). Zunehmende Intensität und Häufigkeit von Störungen (Windwurfereignisse mit nachfolgenden Borkenkäferkalamitäten) führen zu Humus- bzw. Bodenverlusten durch Erosion (sehr wahrscheinlich), zu einer erhöhten Freisetzung von CO_2 aus dem Boden (sehr wahrscheinlich) und zu einer Beeinträchtigung der hydrologischen Bodenfunktionen (wahrscheinlich).

- Die Reaktion der Böden der Hochlagen umfasst gegenläufige Prozesse.

Böden in Hochlagen enthalten leicht abbaubare Komponenten, die im Falle einer Temperaturerhöhung bevorzugt umgesetzt würden (sehr wahrscheinlich). Ob durch einen erhöhten Biomasseeintrag der Bodenkohlenstoffgehalt zunimmt, ist ungewiss (etwa so wahrscheinlich wie nicht). Von zentraler Bedeutung sind die Stabilität und die Qualität des organischen Kohlenstoffs.

- Anthropogene Beeinträchtigungen mindern die Resilienz des Bodens gegenüber dem Klimawandel.

Insbesondere durch Versiegelung, Erosion, Verdichtung und Humusabbau werden die Böden in ihrer Funktionalität stark eingeschränkt, wodurch sie auch gegenüber den Einflüssen des Klimawandels weniger resilient sind (sehr wahrscheinlich).

- Das Erosionsrisiko wird durch Klimawandel erhöht.

Durch die Zunahme von Witterungsextremereignissen (Niederschlag, Wind) kann bei unvollständiger oder fehlender Bodenbedeckung von Ackerböden die Erosion durch Wasser und Wind zunehmen (wahrscheinlich). Durch höhere Temperaturen können Böden häufiger austrocknen und sind für Abtrag durch Wind anfälliger (wahrscheinlich).

5 Der Einfluss des Klimawandels auf die Pedosphäre
5 Climate Change Impact on the Pedosphere

Einleitend werden grundlegende Zusammenhänge im System Pedosphäre skizziert und auf den Einfluss des Klimawandels bezogen. Anschließend wird ein kurzer Überblick zu den in Österreich vorliegenden Bodendaten sowie zu Ansätzen des Bodenmonitorings gegeben, die einen wesentlichen Teil der nationalen Wissensbasis darstellen. Die folgenden Kapitel sind dem Einfluss des Klimawandels auf die Böden gewidmet. Hier stehen zunächst jene Prozesse im Vordergrund, welche im Boden ablaufen und vom Klimawandel beeinflusst werden bzw. diesen beeinflussen können. Anschließend werden Auswirkungen des Klimawandels im Hinblick auf bestimmte Bodennutzungen thematisiert. Ergänzend werden Aspekte anthropogener Beeinträchtigungen aufgegriffen, da diese für die Vulnerabilität der Böden relevant sind. Abschließend werden die Folgen des Klimawandels unter dem Gesichtspunkt der Ökosystemleistungen von Böden diskutiert.

In der bisherigen Diskussion kommen die Wirkungen des Klimawandels auf die Böden zu kurz. Böden werden häufig lediglich in Bezug auf die Auswirkungen des Klimawandels auf die Land- und Forstwirtschaft erwähnt (z. B. Götzl et al., 2011), wobei vor allem die Folgen für die Pflanzen und das Bodenwasser thematisiert werden. Diese sehr eingeschränkte Betrachtung des Bodens mag damit zusammenhängen, dass er wenig öffentliche Aufmerksamkeit erfährt, aber auch damit, dass die Reaktionen von Böden eher langfristig ausfallen und noch zu wenig erforscht sind. Aus dem Verständnis der im Boden ablaufenden Prozesse ist es zweifelsfrei, dass Böden auf Klimaänderungen reagieren (Blume et al., 2010b). Noch weitgehend unerforscht ist, wie intensiv und in welchen Zeiträumen dies geschieht und ob es dabei kritische Punkte gibt, bei denen das System in einen neuen Zustand gelangt.

5.1 Prozesse und Dynamiken im System Pedosphäre
5.1 Processes and dynamics in the pedosphere system

5.1.1 Bodenbildende Faktoren und Prozesse

Unter dem Begriff der Pedosphäre wird die Vielfalt der Böden in ihrer globalen Verbreitung zusammengefasst (Blume et al., 2010b). In der Pedosphäre durchdringen sich Litho-, Hydro-, Atmo- und Biosphäre und führen zu einem spezifischen räumlichen Muster unterschiedlich ausgeprägter Böden. Diese räumliche Differenzierung ist in Bezug auf die Auswirkungen des Klimawandels entscheidend, sodass im weiteren Text nur noch von Boden bzw. Böden als Teile dieser globalen Pedosphäre gesprochen wird.

Nach ÖNORM L 1076 (2013) wird der Boden als „oberster Bereich der Erdkruste, der durch Verwitterung, Um- und Neubildung (natürlich oder anthropogen bedingt) entstanden und weiter veränderbar ist," definiert (vgl. Box 5.1). Blum (2007) differenziert die Struktur und die Komponenten des Bodens genauer, nämlich als „eine von der Erdoberfläche bis zum Gestein reichende, in Horizonte gegliederte, mit Wasser, Luft und Lebewesen durchsetzte Lockerdecke (Ausschnitt aus der Pedosphäre), die durch Umwandlung anorganischer und organischer Ausgangsstoffe, unter Zufuhr von Stoffen und Energien aus der Atmosphäre neu entstanden ist und in der diese Umwandlungsprozesse weiter ablaufen (dynamisches, dreiphasiges System)". Zum Verständnis des Systems Boden müssen die sogenannten bodenbildenden Faktoren sowie die von ihnen gesteuerten, im Boden ablaufenden Prozesse und die daraus entstehenden Bodenmerkmale differenziert werden (vgl. Abbildung 5.1).

Das komplexe Zusammenwirken der bodenbildenden Faktoren (einschließlich ihrer gegenseitigen Beeinflussung) steuert im Boden eine Reihe von Prozessen. Die konkreten Merkmale und damit auch Eigenschaften von Böden sind das Ergebnis dieser Prozesse über einen mehr oder weniger langen Zeitabschnitt. Um den Einfluss des Klimawandels auf die Böden abschätzen zu können, muss herausgearbeitet werden, wie die

unterschiedlichen Bodenprozesse durch den Wandel einzelner Klimaparameter verändert werden. Ob und in welchem Maße sich dabei auch die Merkmale und Eigenschaften der Böden ändern, hängt davon ab, wie stark die Prozesse modifiziert werden und wie lange diese einwirken.

5.1.2 Einfluss des Klimas auf Boden und Bodenbildung: Direkte und indirekte Faktoren

Die Bedeutung des Klimas für die Bodenbildung zeigt sich im globalen Maßstab an der Ausprägung der Bodenzonen, welche eng mit den Klimazonen zusammenhängen (Zech und Hintermaier-Erhard, 2002; Schultz, 2002). Je kleinräumiger die Betrachtung ausfällt, desto stärker treten die bodenbildenden Faktoren Gestein, Relief, Vegetation und die Nutzung durch den Menschen in den Vordergrund. Dennoch spielt der Einfluss des Klimas auch bei den kleinsten Bodeneinheiten eine dominante Rolle. So ist davon auszugehen, dass Veränderungen im Klimasystem über alle Maßstäbe hinweg Veränderungen im Bodensystem hervorrufen werden. Dabei sind insbesondere das Mikroklima an der Bodenoberfläche und die Temperatur- und Feuchtebedingungen im Boden relevant, was bedeutet, dass die klimatischen Einflussgrößen durch die üblichen meteorologischen Stationsdaten nur unzureichend repräsentiert sind.

Temperatur und Niederschlag stellen zwei der wichtigsten Klimaelemente für den Boden dar (Blume et al., 2010b), wobei nicht nur Mittelwerte, sondern auch der saisonale Verlauf und seltene Extremwerte zu berücksichtigen sind. In Bezug auf den Niederschlag ist jener Anteil für die Bodenbildung entscheidend, der versickert. Der Anteil, der oberflächlich abfließt, kann zu Erosion an der Bodenoberfläche führen. Es wirken aber nicht nur die einzelnen Klimaelemente auf den Boden ein, sondern auch komplexere klimatische Bedingungen, die sich aus dem Zusammenspiel einzelner Klimaelemente ergeben. Zu nennen sind z. B. die Dauer von Vegetationszeiten, Aktivitätszeiten der Bodenlebewelt, Aper- bzw. Schneebedeckungszeiten oder auch die Dauer und Häufigkeit von Trockenphasen. Veränderungen dieser komplexen Klimabedingungen dürften für den Boden eine große Rolle spielen, sind aber in ihrer zukünftigen Entwicklung ungleich schwerer abzuschätzen. Als dritte Gruppe klimagesteuerter Einflussgrößen auf den Boden sind jene indirekten Faktoren zu nennen, die ihrerseits klimasensitiv sind, v. a. die Vegetation (vgl. Band 2, Kapitel 3). Eine veränderte Vegetation kann über das Mikroklima, die Bodenbedeckung, den Bodenwasserhaushalt, das Wurzelsystem und die Streu auch den Zustand des Bodens maßgeblich und schon in kurzer Zeit verändern.

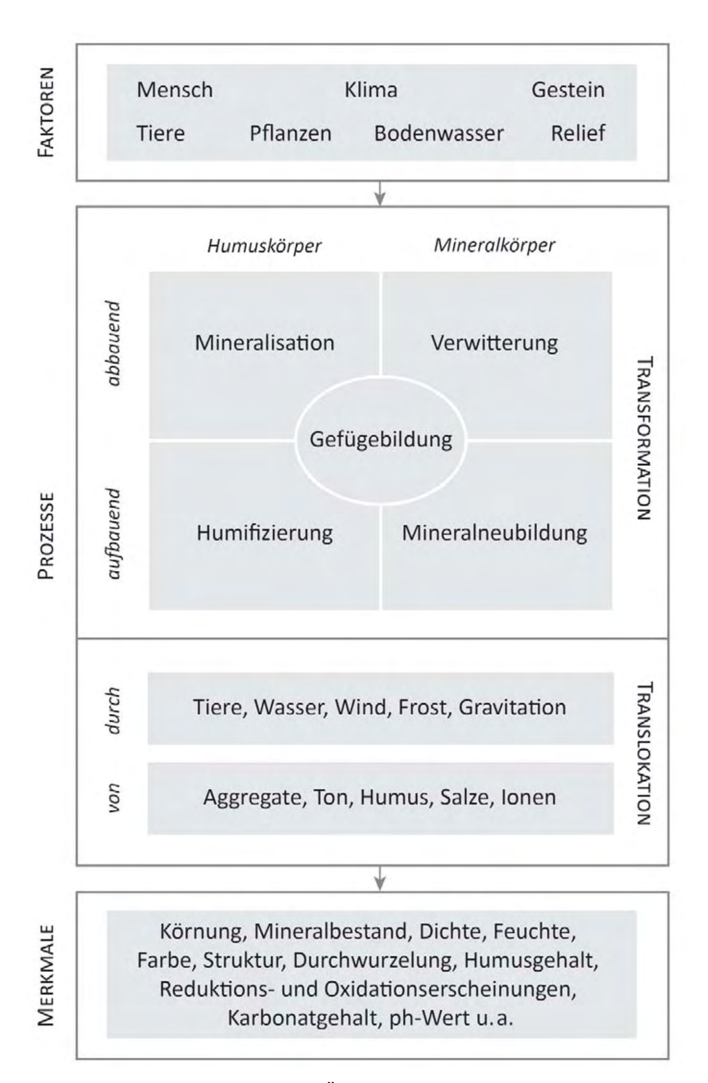


Abbildung 5.1 Schematischer Überblick zu den bodenbildenden Faktoren und Prozessen und den sich daraus ergebenden Merkmalen des Bodens. Die Vielfalt an Faktoren und Prozessen sowie ihrer Kombinationsmöglichkeiten lassen erahnen, wie schwer die Zusammenhänge im System Boden zu identifizieren und zu quantifizieren sind. Erstellt von Geitner für AAR14

Figure 5.1 Schematic overview of the soil forming factors and processes, and the resultant soil features. The high diversity of factors and processes and their possible combinations indicate the difficulties in identifying and quantifying interrelations in the soil system. Developed by Geitner for AAR14

5.1.3 Zeitliche Aspekte der Klimasensitivität von Böden

Jeder Boden hat sich über eine bestimmte Zeit entwickelt. Ohne diese zeitliche Dimension können seine Eigenschaften nicht erklärt werden. In Abhängigkeit von der quartären Kli-

Box 5.1: Was ist Boden?
Box 5.1: What is soil?



Box 5.1 Abbildung 1 Bodenprofil einer „Typischen Braunerde" aus dem Wienerwald. Boden im bodenkundlich-ökologischen Verständnis umfasst die wenigen Dezimeter von der organischen Auflage bis zum anstehenden Gestein. Der oberste, meist deutlich dunklere Horizont ist von Humus durchsetzt und intensiv belebt. Die Wurzeln reichen meist bis in die tieferen, verwitterten Bereiche. Trotz ihrer geringen Mächtigkeit erfüllen Böden eine Fülle von Funktionen (vgl. Abschnitt 5.2.2). Insbesondere der intensiv belebte Oberboden ist sehr vulnerabel gegenüber physikalischen und chemischen Belastungen. Das Foto zeigt den Bodentyp „Typische Braunerde" (Nestroy et al., 2000, 2011) aus dem Wienerwald. Foto: R. Reiter

Box 5.1 Figure 1 Soil profile of a „typical brown earth" from the Vienna Woods. Soil in a soil-scientific and ecological sense includes the few decimeters from the organic layer to the non-weathered parent material. The uppermost, usually darker, horizon is characterized by humus enrichment and biological activity. The roots reach further down into the weathered zone. In spite of their shallowness, soils perform highly diverse functions (see Chapter 5.2.2).The living topsoil is particularly vulnerable to physical and chemical stresses. The photograph shows the soil type „brown earth" from the Vienna Woods. Photograph by R. Reiter

mageschichte und der Ausdehnung der Gletscher zum Höchststand der letzten Vereisung repräsentieren die meisten Böden Österreichs maximal rund 12 000 (Beginn Holozän) oder maximal rund 20 000 Jahre (nach der maximalen Gletscherausbreitung) (van Husen, 1987). Nicht vergletscherte Gebiete und damit während der letzten Kaltzeit periglazial geprägte Böden sind in Österreich auf die nördlichen und östlichen Tief-, Hügel- und Terrassenländer beschränkt. Böden können aber auch viel jünger sein, wenn es in ihrer Entwicklung zu morphodynamischen Störungen (Erosion oder Akkumulation) gekommen ist. Mit ihren aktuellen Merkmalen integrieren die Böden die physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse während ihrer gesamten Bildungsphase (Lorz, 2008) und können somit auch zur Rekonstruktion klimatischer Veränderungen in der Vergangenheit herangezogen werden (vgl. Band 1, Kapitel 3; Bork et al., 2003; Starnberger et al., 2009).

Im Hinblick auf die Analyse aktueller Veränderungen in Böden sind speziell die darin ablaufenden Prozesse ins Auge zu fassen (vgl. Abbildung 5.1), da diese rascher als die Bodenmerkmale auf Änderungen der bodenbildenden Faktoren reagieren können. Unter den Bodenprozessen im Vergleich ist davon auszugehen, dass die biologisch gesteuerten am unmittelbarsten auf Veränderungen reagieren, gefolgt von chemisch und physikalisch kontrollierten Reaktionen (Blume et al., 2010b). Dementsprechend ist zunächst vor allem mit Veränderungen der organischen Substanz durch den Klimawandel zu rechnen. Tabelle 5.1 bietet eine Übersicht zu den Prozessen im Boden und ihren abgeschätzten Sensitivitäten gegenüber dem Klimawandel.

Zu den Veränderungen der Bodenprozesse gibt es in Österreich keine kontinuierlichen Dauerbeobachtungen, sodass entsprechende Daten fehlen. Zur Untersuchung der Veränderlichkeit ausgewählter Bodenprozesse bieten sich einerseits experimentelle Ansätze unter definierten Rahmenbedingungen sowohl im Freiland als auch im Labor an. In diesem Zusammenhang sind z. B. Messungen der Bodenatmung unter kontrollierten Temperatur- und Feuchtebedingungen zu nennen, wie sie in den letzten fünf Jahren intensiv durchgeführt werden (vgl. Abschnitt 5.4.3). Andererseits kann auch die Analyse von Boden-Chronosequenzen, wie sie beispielsweise im Einflussbereich von großen Flüssen zu finden sind, herangezogen werden (Zehetner et al., 2009). Die Ergebnisse beider Ansätze können für plausible Abschätzungen der durch veränderte Umweltbedingungen bedingten, überwiegend chemischen und mikrobiologischen Veränderungen im Boden verwendet werden. Wichtig ist jedoch, in Studien mit experimentellem Ansatz auch die Langzeitkomponente zu berücksichtigen, denn es ist weitgehend ungeklärt, ob und bei welchen Pro-

Tabelle 5.1 Abschätzung der Sensitivität von Prozessen im Boden in Bezug auf den Klimawandel. Erstellt von Geitner für AAR14
Table 5.1 Assessment of the sensitivity of processes in soils related to climate change. Developed by Geitner for AAR14

Prozesse	Sensitivität	Erläuterungen
Mineralkörper		
Physikalische Verwitterung	++	A oder Z: abhängig von Höhenstufe (Frostwechselhäufigkeit)
Chemische Verwitterung	++	Z: bei Erhöhung der Temperatur (nivale/alpine Stufe) A: bei trockenen Verhältnissen
Biologische Verwitterung	+	A oder Z: bei Vegetationsänderungen
Oxidation	+	Z: bei trockenen Verhältnissen
Reduktion	+	Z: bei feuchten Verhältnissen
Tonmineralbildung	+	A: bei trockenen Verhältnissen
Tonverlagerung	+	A: bei trockenen Verhältnissen
Podsolierung	+	A: bei trockenen Verhältnissen
Carbonatisierung	+	Z: bei trockenen, wechselfeuchten Verhältnissen A: bei feuchten Verhältnissen
Humuskörper		
Mineralisation	+++	Z: bei durchschnittlichen Bedingungen A: bei trockenen oder bei sehr feuchten Verhältnissen
Humifizierung	+	A oder Z: in Abhängigkeit von weiteren Faktoren (z. B. Feuchtigkeit, chemische Zusammensetzung der Streu)
Sonstige		
Austauschprozesse (Ionen)	+	A: bei trockenen Verhältnissen
Aggregatbildung	+	in Abhängigkeit von sonstigen Bedingungen
Bioturbation	++	in Abhängigkeit von sonstigen Bedingungen
Kryoturbation	++	in Abhängigkeit von Dauer der Frostphasen und Anzahl der Frostwechsel, unterschiedlich nach Höhenlage

A = Abnahme, Z = Zunahme, + = mäßige, ++ = mittlere, +++ = starke Wirkung erwartet

zessen im Boden selbstverstärkende Entwicklungen in Gang gesetzt werden bzw. ob und in welcher Zeit das System wieder einen gewissen Gleichgewichtszustand erreicht. Chronosequenzanalysen geben dafür erste Anhaltspunkte, allerdings erscheinen kontinuierliche Langzeitbeobachtungen über mindestens zehn Jahre hinweg zur Feststellung von Kausalitäten unabdingbar.

5.1.4 Räumliche Aspekte der Klimasensitivität von Böden

Je vielfältiger eine Region hinsichtlich der Faktoren Gestein, Relief und Klima ausgestattet ist, desto zahlreicher sind die dort vorkommenden Bodeneinheiten. Im Hinblick auf die Abschätzung der Einflüsse des Klimawandels muss dieser Vielfalt der Böden unbedingt Rechnung getragen werden. Ein Boden in einer feuchten Senke am schattigen Talgrund wird aufgrund des Wasserüberschusses und des spezifischen Mikroklimas auf eine Temperaturerhöhung anders reagieren als ein Boden in südexponierter Hanglage, der ohnehin durch Wärme und Trockenstress gekennzeichnet ist. Für belastbare Aussagen zur Sensitivität von Böden muss daher räumlich entsprechend differenziert werden. Dies trifft insbesondere für Gebirgslandschaften zu, wo durch die Kombination von Höhenstufen, Neigung und Exposition extrem kleinräumige Klima-Boden-Systeme bestehen (Geitner, 2007). Wie sensitiv ein Boden auf Klimaänderungen reagiert, hängt aber nicht nur von seiner Lage, sondern auch von seinen physikalisch-chemischen Eigenschaften ab. So steuern beispielsweise Korngrößenverteilung und Humusgehalt den Wasserhaushalt, sodass beispielsweise in Trockenphasen die tatsächliche Austrocknung der Böden unterschiedlich stark ausfällt (Blume et al., 2010b). Daher sind Böden gegenüber Witterungsschwankungen unterschiedlich gut gepuffert und somit unterschiedlich resilient. Vor diesem Hintergrund gilt es mit den vorhandenen Bodendaten herauszufinden, welche Böden von klimatischen Veränderungen insofern besonders betroffen sind, als deren extreme Systemzustände durch den Klimawandel kritisch zu-

nehmen. Diese Abschätzungen sind nicht nur für den Boden selbst relevant, sondern auch im Hinblick auf seine Ökosystemleistungen (vgl. Abschnitt 5.6).

5.2 Bodendaten in Österreich: Bestand und Auswertungsmöglichkeiten
5.2 Soil data in Austria: inventory and evaluation possibilities

Als Voraussetzung, um Aussagen zu den Wechselwirkungen zwischen Klimawandel und Boden treffen zu können, sind umfangreiche Datengrundlagen erforderlich. Mit den in Österreich vorhandenen Bodenaufnahmesystemen werden Informationen über Böden gesammelt und für die weitere Anwendung für Land-, Forst-, Wasser- und Abfallwirtschaft, Naturschutz, Raumplanung sowie für Forschung und Lehre zur Verfügung gestellt. Zum Teil wurden diese Daten über Pedotransferfunktionen[1] in komplexere Bodenparameter umgerechnet (Murer et al., 2004) und als Grundlagen für die Erstellung thematischer Karten (z. B. Karte der nutzbaren Feldkapazität) herangezogen. Diese stellen somit weiterführende, bereits anwendungsnahe Bodeninformationen zur Verfügung. Da in Österreich die Erhebung und Verwaltung der Bodeninformationen von unterschiedlichen Institutionen durchgeführt wird (Schwarz et al., 2001), liegen diese in uneinheitlicher Form vor.

5.2.1 Bodendaten und Bodenmonitoring

Flächendaten

Flächenbezogene Daten liegen in Form von Bodenkarten vor, die neben der graphischen Darstellung noch Zusatzinformationen (Attributdaten) enthalten. Für die gesamte landwirtschaftlich genutzte Fläche Österreichs existieren zwei flächendeckende Bodendatenbestände: Die Bodenkartierung (Bodenkarte) und die (Finanz-)Bodenschätzung.

Die Daten der österreichischen Bodenkartierung liegen in analoger und digitaler Form vor. Die analoge Bodenkarte im Maßstab 1 : 25 000 unterteilt die Staatsfläche in viele Kartierungsbereiche und besteht für jeden Kartierungsbereich aus Kartenblättern und einem Erläuterungsheft, das die Beschreibungen der Bodenformen (u. a. Bodentyp, Ausgangsgestein, Relief), Profildarstellungen und chemische sowie physikalische Analysedaten (u. a. pH-Wert, Humus- und Kalkgehalt) enthält. All diese Daten wurden in digitale Bodenkarten überführt, die über die Web-GIS-Applikation eBOD auch im Internet abgerufen werden können (BFW, 2012). Die Bodenkarte orientiert sich überwiegend an der Österreichischen Bodensystematik gemäß Fink (1969). Die Aufnahmen ab dem Jahr 2000 entsprechen der aktuellen Fassung der Bodensystematik, die von Nestroy et al. (2000, 2011) entwickelt wurde.

Die Finanzbodenschätzung zur Feststellung der Bodenqualität dient als eine der Grundlagen für die Besteuerung landwirtschaftlicher Betriebe. Die Ergebnisse sind bundesweit in Karten auf Basis der Katastralmappe (Maßstab 1 : 2 000) dargestellt sowie in Büchern festgehalten. Die Schätzungsreinkarte weist Klassenflächen (Flächen mit gleichem Ertragspotential) aus und enthält entsprechende Wertzahlen für jede Klassenfläche (Acker- und Grünlandzahlen). Das Schätzungsreinbuch beinhaltet kurze Profilbeschreibungen, den Bodentyp sowie Aussagen zu Gelände und Klima.

Flächenbezogene Daten für Waldböden liefert die Forstliche Standortkartierung, die in der Vergangenheit von unterschiedlichen Urhebern (u. a. Bundesforschungszentrum für Wald, Österreichische Bundesforste, Landesforstdirektionen, Landeskammern, Universität für Bodenkultur) durchgeführt wurde. Das Bundesforschungszentrum für Wald (BFW) übernimmt als zentrale Anlaufstelle die Koordination und Qualitätssicherung von Standortkartierungs-Projekten. Derzeit sind etwa 15 % der österreichischen Waldfläche kartiert (Englisch et al., 2001a). Je nach Aufgabenstellung stehen verschiedene Darstellungsmöglichkeiten zur Verfügung, Darstellungen von Standorteinheiten (Maßstab 1 : 10 000) oder Übersichtsdarstellungen (Maßstab 1 : 25 000 bis 1 : 200 000). Die Karten enthalten Ausweisungen der Standorteinheiten (Standorte mit ähnlicher Faktorenkombination [Regionalklima, Bodenform, Reliefform, Höhenlage, Grundgestein, Wasserhaushalt und Komponenten des Bodens wie Textur und Gründigkeit] und Wuchsbedingungen) wie der Zustandsformen. Ein Erläuterungsband enthält textliche Beschreibungen des Kartierungsgebietes, Klassifizierungstabellen und Beilagen.

Punktdaten

In Österreich gibt es eine Fülle von Punktdaten zu Böden, die aus unterschiedlichen Erhebungen stammen und unter verschiedenen Zielsetzungen erhoben wurden (Schwarz et al., 2001): Daten der Landwirtschaftlichen und Forstlichen Bo-

[1] Rechenmodelle zur Abschätzung bodenphysikalischer Kenngrößen aus Standardmessgrößen (z. B. Berechnung der Feldkapazität aus den Messgrößen Bodenart, Trockenrohdichte, Gehalt an organischer Substanz und Grobbodenanteil)

Tabelle 5.2 Übersicht über erhobene Parameter der wichtigsten Punktdatensätze zu den Böden in Österreich. Quelle: Schwarz et al., 2001

Table 5.2 Breakdown of captured parameters for major Austrian point data sets. Source: Schwarz et al., 2001

	WBZI (Waldbodenzustands-Inventur) (514)	GEA (Waldbodendatenbank) (ca. 5000)	Profildaten Bodenkartierung (20000)	Bundes- und Landesmusterstücke (426)	Vergleichsstücke Bodenschätzung (ca. 30000)	Klassenflächenprofile Bodenschätzung (1400000)	Bodenanalysen für Düngeberatung (ca. 150000)	BZIs (Bodenzustandsinventuren) (5462)	Cäsiumdaten (2373)	BDB-Flächen (Bodendauerbeobachtung) (30)	Einzelerhebungen in BORIS (1754)	BOKU: Inst. f. Bodenforsch., Inst. f. Waldökol. (ca. 600)	Weitere Einzelerhebungen (ca. 1000)
Georeferenzierung	x	x	x	x	x	x	-	x	x	zT	x	zT	zT
Allgem. Standortsmerkmale	x	x	x	x	x	x	-	x	-	x	zT	zT	zT
Bodenhydrologische Situation	x	x	x	x	x	zT	zT	x	-	x	zT	zT	zT
Bodenspez. Standortsmerkmale	x	x	x	x	x	zT	-	x	-	x	zT	zT	zT
Vegetationskundl. Parameter	x	zT	-	zT	-	-	-	-	-	zT	zT	zT	zT
Bodentyp	x	x	x	x	x	x	-	x	zT	x	zT	zT	zT
Profilbeschreibung	x	x	x	x	x	zT	-	x	zT	x	zT	zT	zT
Bodenphysik. Parameter Feld	x	x	zT	zT	x	zT	zT	zT	-	zT	zT	zT	zT
Bodenphysik. Parameter Labor	zT	zT	zT	zT	-	-	zT	zT	-	zT	zT	zT	zT
Allgemeine Parameter Labor	x	x	x	x	-	-	zT	x	-	x	zT	zT	zT
Nährstoffe	x	x	x	zT	-	-	x	x	-	x	zT	zT	zT
Nährstoffverfügbarkeit	x	zT	x	zT	-	-	x	x	-	x	zT	zT	zT
SM-Gesamtgehalte	x	zT	zT	-	-	-	zT	x	-	x	zT	zT	zT
SM-mobile Anteile	x	-	-	-	-	-	-	zT	-	x	zT	zT	zT
Bodenbiologische Parameter	-	-	-	-	-	-	-	zT	-	zT	zT	zT	zT
Organische Schadstoffe	zT	-	-	-	-	-	-	zT	-	zT	zT	zT	zT
Sonderdaten	x	zT	-	zT	zT	zT	-	zT	Cs	zT	zT	zT	zT
Daten digital verfügbar	x	x	zT	zT	zT#	zT#	-	x	x	zT	x	zT	-
Daten über BORIS verfügbar	x	zT	-	-	-	-	-	x	x	zT	x	-	-

Erläuterung: x … ist großteils erfüllt, zT … ist zum Teil erfüllt, # … ist zu 5–10 % erfüllt, (514) = Anzahl der Standorte

denzustandsinventur, Daten von Bodendauerbeobachtungen, Cäsiumdaten, Bodenanalysedaten im Rahmen der Düngeberatung (vgl. Tabelle 5.2). Außerdem enthalten die flächenhaften Datenbestände der Bodenkartierung und Bodenschätzung auch Punktdaten wie Profildarstellungen, Bundes- und Landesmusterstücke sowie Vergleichsstücke.

Vor allem in den 1990er Jahren wurden von den zuständigen Ämtern der einzelnen Landesregierungen Inventuren zur Erfassung des Bodenzustands in Hinblick auf Nährstoffversorgung und Schadstoffbelastung durchgeführt. Insgesamt wurden in Form eines Rasters mit Netzweiten zwischen 1,38 und 8,70 km österreichweit ca. 6000 Probeflächen untersucht. Die Ergebnisse sind in den Bodenzustands-Inventurberichten der einzelnen Bundesländer sowie dem 3., 4. und 5. Umweltkontrollbericht des Umweltbundesamtes enthalten (z. B. Umweltbundesamt, 1998).

Zur Erfassung der zeitlichen Veränderungen der Böden war ursprünglich eine regelmäßige Wiederholung der Bodenzustandsinventuren vorgesehen, die jedoch aufgrund der hohen Kosten bis auf wenige Ausnahmen (etwa im Zuge des Projekts BioSoil, vgl. Mutsch und Leitgeb, 2009; Mutsch et al., 2013) nicht umgesetzt wurde. Stattdessen entschied man sich für die Einrichtung von Bodendauerbeobachtungsflächen. Durch dieses Monitoring auf einer geringeren Zahl von Untersuchungsflächen können Messungen wesentlich intensiver durchgeführt werden.

Aufgrund der heterogenen Datenstruktur und der Vielzahl an unterschiedlichen Urhebern wurde vom Umweltbundesamt das Bodeninformationssystem BORIS entwickelt. Dieses ermöglicht österreichweite Abfragen zum Überblick über die vorhandenen Einträge von bestimmten Bodenparametern und bodenrelevanten Zusatzinformationen. Darüber hinaus werden Kartendarstellungen ausgewählter Bodenaspekte (Schwermetalle, Humus) zur Verfügung gestellt.

Ein ausführlicher Überblick über die Gesamtheit der in Österreich verfügbaren Bodendaten ist bei Englisch et al. (2001b) zu finden. Tabelle 5.2 listet die erhobenen Parameter der wichtigsten Punktdatensätze in Österreich auf.

Eine kritische Betrachtung der Datenbestände ist insofern wichtig, als mögliche Auswirkungen des Klimawandels nur dann realistisch abgeschätzt, modelliert oder (in langfristigen Monitoringsystemen) beobachtet werden können, wenn die Böden räumlich, systematisch und messtechnisch differenziert genug erfasst sind. Zudem kann eine umfassende Dokumentation der Böden den sorgsamen Umgang mit dieser Ressource im Sinne der Nachhaltigkeit fördern. Das nachfolgende Kapitel zeigt auf, wie die vorhandenen Bodendaten etwa durch die Bodenfunktionsbewertung in den Dienst des Bodenschutzes gestellt werden können.

5.2.2 Bodenbewertung und Bodenschutz

Bodendaten können als Grundlage für die funktionsbezogene Bewertung von Böden herangezogen werden. Diese spielt jedoch in Österreich aktuell noch eine untergeordnete Rolle und hat im Sinne des vorsorgenden Bodenschutzes noch kaum in die Planungspraxis Eingang gefunden. Dabei bietet eine umfassende funktionsbezogene Bewertung der Böden auch für die Abschätzung klimabedingter Veränderungen und deren Auswirkungen auf bodenbezogene Ökosystemleistungen eine solide Basis. Bisher beschränkte sich die Bewertung des Bodens im engeren Sinne (anhand einer feldbodenkundlichen Ansprache) auf die Finanzbodenschätzung (vgl. Abschnitt 5.2.1). Andere thematische Karten (vgl. Abschnitt 5.2.1) stellen erste Bewertungsansätze dar, indem aus den Erhebungsparametern bodenphysikalische Größen abgeleitet wurden. Ein Beispiel dafür ist die Karte der nutzbaren Feldkapazität, die eine wesentliche Größe zur Bestimmung des Bodenwasserhaushaltes darstellt und damit etwa der Landwirtschaft oder dem Hochwasserschutz wichtige Informationen liefert.

Bei der funktionsbezogenen Bewertung der Böden werden Funktionen (Lebensraumfunktion, Funktion des Bodens im Wasserhaushalt, Filter-, Puffer- und Transformationsfunktion etc.) als Leistungen des Bodens betrachtet und deren Erfüllungsgrad beurteilt. Mit dem Instrument der Bodenfunktionsbewertung kann dem Schutzgut Boden in der Planung sowie in Umweltprüfungen entsprechend seiner Bedeutung als wertvolle, endliche Ressource angemessen Rechnung getragen werden. Eine entsprechende ÖNORM zur Bodenfunktionsbewertung (ÖNORM L 1076, 2013) sowie eine begleitende Handreichung für ihre Umsetzung (BMLFUW, 2013) wurden jüngst erarbeitet.

In Bezug auf die gesetzliche Situation ist der Boden in Österreich eine Querschnittsmaterie. Diesbezüglich bemerkt Norer (2009: 34): „Aus kompetenzrechtlicher Sicht berühren zwar zahlreiche Bundeszuständigkeiten bodenschutzrelevante Aspekte, das „klassische Bodenschutzrecht“ ist jedoch gemäß Artikel 15 B-VG den Ländern vorbehalten.“ Allerdings verfügt nicht jedes Bundesland über ein Bodenschutzgesetz. Nach Raschauer (2002) werden von Bund und Ländern die Möglichkeiten für eine rechtliche Verankerung eines umfassenden Bodenschutzes derzeit nicht in zufriedenstellendem Ausmaß ausgeschöpft.

5.3 Einfluss des Klimawandels auf den Boden
5.3 Impact of climate change on the soil

Im Folgenden werden jene Prozesse und Eigenschaften im Boden ausführlicher besprochen, für die durch den Klimawandel Veränderungen zu erwarten sind oder bereits festgestellt werden konnten (zur aktuellen Situation und den Szenarien vgl. Band 1). Bei physikalischen oder chemischen Prozessen, wie beispielsweise der Verwitterung, sind Veränderungen nur schwer nachweisbar, da diese in der Regel nur sehr gering ausfallen dürften. Wesentlich stärkere Auswirkungen sind zu erwarten, wenn der Wasserhaushalt und die Lebewelt des Bodens betroffen sind.

5.3.1 Wasserhaushalt

Aufgrund des Klimawandels werden Veränderungen der Niederschlagsmengen, der Intensität aber auch der saisonalen Niederschlagsmuster erwartet (Beniston, 2006; BMU, 2007). Die Extrapolationen lassen auf ein vermehrtes Auftreten von Extremereignissen schließen. Zudem werden ein Temperaturanstieg und eine höhere saisonale Temperaturvariabilität prognostiziert (EEA, 2009; EEA und OPOCE, 2009). Es soll zu ausgeprägten und längeren Nass- und Trockenperioden kommen. Durch eine Erhöhung der Temperatur nimmt das Verdunstungspotential zu. Das führt zu einer Veränderung der klimatischen Wasserbilanz als Differenz zwischen Niederschlag und potentieller Evapotranspiration (ATV-DVWK, 2002) und bedeutet, dass sich langfristig die Gebiete mit einer negativen klimatischen Wasserbilanz ausweiten (zu aktuellen Szenarien vgl. Band 1).

Zurzeit nehmen in Österreich die Bereiche mit einer langjährigen mittleren negativen klimatischen Wasserbilanz eine Fläche von ca. 11 % ein (BMLFUW, 2007). Bezugnehmend auf Stenitzer (1991) soll die kontinuierliche Erwärmung bei gleichzeitiger Abnahme der Niederschläge in den trockenen Regionen zu deutlichen Rückgängen der Sickerwassermenge führen, was auch ein Absinken des Grundwasserspiegels zur Folge hätte (vgl. Band 2, Kapitel 2; Erhart et al., 2003). Dadurch würden Böden, die jetzt noch unter Grundwassereinfluss stehen (Gleye, Auböden, Niedermoore) sowie alle wasserbeeinflussten Biotope weiter zurückgehen (Herbst und Hörmann, 1998; IPCC, 2001b; Dawson et al., 2003). Trockenstressbedingte Ertragseinbußen bei land- und forstwirtschaftlicher Nutzung sind auf Böden mit geringer Wasserspeicherfähigkeit zu erwarten (Stenitzer, 1986, 2001, 2003; Stenitzer und Hösch, 2004). Eine wesentliche Zunahme des Bewässerungswasserbedarfs innerhalb der Saison wie auch des Flächenanteils bewässerter Kulturen ist zu erwarten. Dabei ist die Gefahr gegeben, dass es zu Versalzungsphänomenen kommt. Es ist zudem von einer Verschiebung und Ausweitung der thermischen Vegetationsperiode und damit einer Anpassung der Kulturen auszugehen, was auch Auswirkungen auf den Abbau organischer Substanz in den Böden hätte (Chmielewski, 2007).

Im nördlichen Alpenvorland und in der Schlufflehm-Decke der Südost-Steiermark sind vergleyte tiefgründige Böden (Pseudogleye, pseudovergleyte Braunerden) sehr verbreitet (Murer, 2009; BFW, 2012). Durch den Klimawandel könnte sich der Bodenwasserhaushalt dieser Böden verbessern, sodass sich auch die Ertragssicherheit erhöhen würde (Murer, 2002). Der Wasserhaushalt würde zwar auf Pseudogleyen mit hoch anstehendem Staukörper ausgeglichener, an Standorten mit tief liegendem Staukörper, die aktuell ausreichend wasserversorgt sind, könnte es aber zu trocken werden, worunter die Ertragssicherheit leiden würde (vgl. Band 2, Kapitel 2).

In Ergänzung der genannten Aspekte streicht das BMLFUW (2008) die Frage der Schadstoffmobilisierung im System Boden-Gewässer unter sich verändernden Klima- und Nutzungsbedingungen als Forschungsbedarf heraus.

5.3.2 Bodenlebewesen

Die Diversität der Bodenlebewesen übersteigt um ein Vielfaches jene der oberirdischen Systeme (Wardle, 2002). Die abgestorbene organische Substanz wird durch Bodentiere, Bakterien und Pilze zerkleinert und zersetzt. Durch die Aktivität der Bodentiere wird der Boden gelockert und durchmischt. So wird die Durchlüftung des Bodens verbessert, der Mineralboden mit Humus angereichert und die Wasserhaltekapazität erhöht.

Diversität und Aktivität der Bodenlebewesen sind abhängig von verschiedenen Umweltbedingungen. Auch wenn bisher kein genereller Zusammenhang zwischen Bodenfeuchte und Bodenorganismen gefunden werden konnte (Pritchard, 2011), kann festgestellt werden, dass gut durchfeuchtete Böden eine höhere mikrobielle Diversität, größere Umsetzungsraten und robustere Populationen aufweisen als sehr trockene (Wardle, 2002).

Eine Temperaturerhöhung müsste aufgrund des vorliegenden Verständnisses biogeochemischer Abläufe fast alle Bodenprozesse beeinflussen: Die globale Erwärmung kann vor allem die Zusammensetzung der Pflanzengemeinschaft und das Wurzelwachstum verändern, wodurch es wiederum zu einer Änderung der Wurzelausscheidung und infolgedessen zu Änderungen der Gemeinschaftsstruktur der Bodenlebewesen kommen kann.

Temperaturextreme haben dabei eine größere negative Auswirkung auf Pflanzen und Bodenlebewesen als eine Veränderung der durchschnittlichen Temperaturen. Sowohl besonders ausgeprägte Gefrier- und Auftauprozesse im Winter als auch starkes und langes Austrocknen des Bodens, gefolgt von einem Starkniederschlagsereignis, lassen die Aktivität und die Umsetzungsraten von z. B. Kohlenstoff und Stickstoff ansteigen. Unmittelbar nach so einem Ereignis kommt es zu Emissionsmaxima von Treibhausgasen aus Böden (Butterbach-Bahl et al., 2013).

Durch den Klimawandel kann auch das Zusammenspiel zwischen Bodenlebewesen, Pflanzen und Insekten gestört werden. Der Nährstoffkreislauf zwischen Pflanze und Boden wird unter Umständen verlangsamt. Wenn es z. B. zu vermehrtem

Insektenfraß kommt, werden Nährstoffe schneller im Boden verfügbar gemacht. So konnten Stevnbak et al. (2012) zeigen, dass Pflanzen unter dem kombinierten Einfluss mehrerer Faktoren, wie erhöhte CO_2-Konzentration, Temperatur und Trockenheit weniger Stickstoff abgeben und Bodenbakterien, aber auch andere Bodenorganismen wie Einzeller, langsamer wachsen. Den Bodenlebewesen steht damit vor allem weniger Stickstoff zur Verfügung, was sich etwa abträglich auf die Fruchtbarkeit des Bodens auswirkt.

Abschließend kann gesagt werden, dass in den meisten Studien die Auswirkungen von Einzelfaktoren auf die Bodenorganismen und deren Aktivität untersucht wurden. Die Studien basieren größtenteils auf Laborexperimenten, deren Ergebnisse nur mit Einschränkungen auf das Freiland übertragen werden können. Die Wechselwirkungen von verschiedenen Klimaelementen (Temperatur, Niederschlag, erhöhte CO_2-Konzentration in der Atmosphäre, Stickstoffverfügbarkeit etc.) in Freilandmanipulationsexperimenten über Dekaden oder länger zu untersuchen, wäre notwendig, um fundierte, langfristig gesicherte Erkenntnisse über die Auswirkung von Klimaänderungen zu erhalten.

5.3.3 Kohlenstoffhaushalt

Weltweit enthalten Böden nach Lal (2008) mit rund 1 550 Gigatonnen organisch gebundenen Kohlenstoff (C_{org}) den größten Anteil der Kohlenstoffvorräte terrestrischer Ökosysteme. Neuere Schätzungen gehen sogar von der doppelten Menge aus (Tarnocai et al., 2009). Der Kohlenstoff wird vor allem im Humus gespeichert, der zu mehr als der Hälfte (ca. 58 %) aus organischem Kohlenstoff besteht. Bodenkohlenstoff ist eine wichtige Voraussetzung für die Bodenbildung, die Erfüllung der Bodenfunktionen und den Erhalt der Bodenfruchtbarkeit. In Österreich sind ca. 820 Megatonnen C_{org} in den Böden gespeichert (Anderl et al., 2012), wovon etwas mehr als die Hälfte auf Waldböden entfällt. Durch den stetigen Kohlenstoffaustausch mit der Atmosphäre spielen Böden eine zentrale Rolle im Klimageschehen. Weltweit geben die Landflächen um ein Vielfaches mehr CO_2 an die Atmosphäre ab (und nehmen in etwa dieselbe Menge wieder auf), als dies durch anthropogene Verbrennung fossiler Energieträger geschieht (Bahn et al., 2009). Umso wichtiger ist es, das natürliche Gleichgewicht zwischen dem Boden und der Atmosphäre zu erhalten. Um die daran beteiligten Prozesse besser abschätzen zu können, stellen Messungen zur Bodenatmung einen wichtigen Input dar (Bahn et al., 2010). Untersuchungen an Wiesenökosystemen zeigten etwa einen engen Zusammenhang zwischen Bodenatmung und Photosynthese der Pflanzen (Bahn et al., 2008). Zudem konnte belegt werden, dass der von der Vegetation aufgenommene Kohlenstoff teilweise sehr rasch über den Boden abgegeben wird und dass ausgeprägte tageszeitliche Unterschiede bestehen (Bahn et al., 2009; Kutsch et al., 2009; Subke und Bahn, 2010).

Die Dynamik des Kohlenstoffhaushaltes im Boden wird im Wesentlichen durch den Eintrag von Biomasse und den Abbau der organischen Substanz durch Bodenmikroorganismen be-

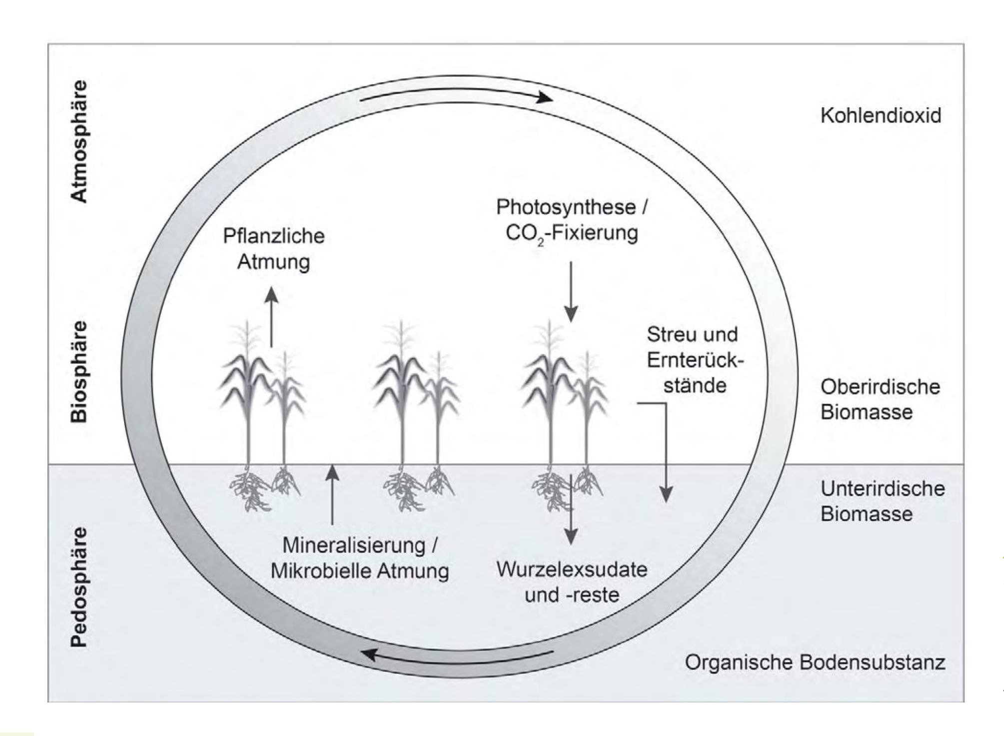


Abbildung 5.2 Schema des Kohlenstoffkreislaufes am Beispiel von Ackerböden. Quelle: nach Kuka (2005)

Figure 5.2 Typical carbon cycle scheme of arable land. Source: adapted from Kuka (2005)

stimmt (vgl. Abbildung 5.2). Temperatur, Feuchtigkeit sowie Nutzungsart und Bewirtschaftungsweise haben wesentlichen Einfluss darauf, ob Humus auf- oder abgebaut wird (Blume et al., 2010b). In stabilen Systemen herrscht ein Gleichgewicht zwischen dem Eintrag an frischer organischer Substanz und der Zersetzung organischer Bodensubstanz, sodass sich für jeden Standort ein charakteristischer Kohlenstoffvorrat im Boden einstellt (vgl. Tabelle 5.3).

Aufgrund der genannten Zusammenhänge kann der Klimawandel Veränderungen der Gehalte und Vorräte an organischer Substanz in Böden bewirken (European Commission, 2008). Steigt die Temperatur, werden die Mineralisationsprozesse im Boden beschleunigt und folglich die organische Bodensubstanz verstärkt abgebaut (Kirschbaum, 1995). Die Zusammenhänge sind jedoch sehr komplex, sodass derzeit keine allgemein gültigen bzw. gesicherten Aussagen über die Veränderungen der Gehalte und Vorräte an C_{org} in den Böden möglich sind, zumal der Stickstoffeintrag aus der Luft die Kohlenstofffestlegung in Boden und Biomasse beeinflusst. Komplexe Rückkoppelungen zwischen den Kohlenstoff- und Stickstoff-Kreisläufen machen hier jede Aussage unsicher.

Schindlbacher et al. (2009, 2012) konnten zeigen, dass aufgrund höherer Temperaturen bei ausreichender Feuchtigkeit der Abbau an organischem Kohlenstoff in Böden beschleunigt wird. Vor allem in der alpinen Höhenstufe ist durch einen Temperaturanstieg mit einer Verlängerung der Vegetationsperiode zu rechnen, wodurch die mikrobielle Umsetzung von Kohlenstoff verstärkt werden kann. Gehen mit dem Temperaturanstieg allerdings auch längere Trockenperioden in der Vegetationszeit einher, schränkt das nicht nur den Eintrag an Kohlenstoff durch die Photosynthese (Reichstein et al., 2013), sondern auch dessen Transport durch die Nahrungsnetze (Seeber et al., 2012) und den Abbau von organischer Substanz ein, wie es auch ein Klimamanipulationsexperiment in Tirol (Schindlbacher et al., 2012) sowie Studien aus den Schweizer Alpen (Hagedorn et al., 2010c) und in mediterranen Gebirgssystemen (Bahn et al., 2008) belegen. Auch die Abnahme von Schneehöhe und Dauer der Schneebedeckung durch wärmeres Klima in subalpinen und alpinen Höhenstufen kann mit einer Verminderung der Bodenatmung im Winter einhergehen. Diese ist auf die niedrigeren Bodentemperaturen durch die geringere Isolation der Schneedecke zurückzuführen (vgl. Band 2, Kapitel 2; Djukic, 2011).

Auch die Einwanderung der Zwergsträucher in die alpinen Rasen (vgl. Band 2, Kapitel 3), die in den letzten 50 Jahren aufgrund von Nutzungsänderungen und / oder einer Temperaturerhöhung aufgetreten ist (Cannone et al., 2007), kann der durch Erwärmung bedingten Erhöhung des Abbaus organi-

Tabelle 5.3 Landnutzungsspezifische C-Vorräte in Böden (t / ha C). Quelle: Anderl et al. (2011)
Table 5.3 Land-use specific C stores in soils (t / ha C). Source: Anderl et al. (2011)

Landnutzung		C-Vorrat in Böden (t / ha C)		Quelle / Daten
		0–30 cm	0–50 cm	
Wald	Mineralboden (Auflagehumus)	-	106 (15)	Weiss et al. 2000
Acker	einjährig	50	60	Gerzabek et al. 2005
	mehrjährig – Wein	48	58	Gerzabek et al. 2005
	mehrjährig – Obst	67	78	Gerzabek et al. 2005
Grünland	intensiv	70	81	Gerzabek et al. 2005
	extensiv	104	119	Gerzabek et al. 2005
Wetland	Gewässer	0	0	Anderl et al. 2011
	Moore	-	500	Anderl et al. 2011
Siedlung	Wohn-, Gewerbeflächen	50	60	Anderl et al. 2011
	Industrie, Bergbau	0	0	Anderl et al. 2011
	Deponie	0	0	Anderl et al. 2011
Sonstiges Land		71	-	Körner et al.1993 (flächengew. Wert)
	Zwergstrauchheide	-	81	Körner et al. 1993
	Schutthalde	-	0	Körner et al. 1993
	Felsen	-	0	Körner et al. 1993
	Sonstige	-	119	Körner et al. 1993

scher Substanz entgegenwirken. Grund dafür ist eine geringere Abbaurate und eine längere Umsatzzeit der Streu (Djukic et al., 2010; Djukic et al., 2011). Ergebnisse einer Höhengradient-Studie zeigen, dass steigende Temperaturen in alpinen Ökosystemen den Abbau von Streu beschleunigen können und auch zu einer raschen Anpassung der Mikroorganismen an die neuen Umweltbedingungen führen (Djukic et al., 2013). Die Ergebnisse legen auch nahe, dass der Klimaeffekt auf den Massenverlust von Streu durch Unterschiede in den Bodenparametern (z. B. pH-Wert, Wassergehalt) ausgeglichen werden kann. Auch ähnliche mikrobielle Gemeinschaften beeinflussen den Streuabbau (Duboc, 2012). Eine Laborstudie mit Material von Waldböden eines Höhengradienten in Tirol auf Karbonatgestein hat gezeigt, dass nicht allein die externen Faktoren für die höhere Abbaurate der organischen Substanz verantwortlich sind; es wurden auch Unterschiede in der Stabilität der organischen Substanz festgestellt. Die Böden der Hochlagen enthielten mehr leicht-abbaubare Komponenten, die im Falle einer globalen Erwärmung bevorzugt abgebaut würden (Schindlbacher et al., 2010).

Die Produktion pflanzlicher Biomasse kann durch Temperatur, aber auch durch eine erhöhte CO_2-Konzentration in der Atmosphäre angeregt werden. Ein erhöhter Biomasseeintrag bedeutet allerdings nicht, dass der Kohlenstoffgehalt im Boden gleichermaßen zunimmt. Für die Senkenwirkung des Bodens ist entscheidend, wie lange der Humus stabil im Boden verbleibt. Studien aus Österreich (z. B. Bahn et al., 2009) und der Schweiz (z. B. Hagedorn et al., 2010c) zeigen, dass ein beträchtlicher Teil des von den Pflanzen in den Boden gepumpten Kohlenstoffs nicht festgelegt, sondern durch Atmung schnell wieder als CO_2 an die Atmosphäre abgegeben wird, teilweise innerhalb weniger Stunden (Grünland) bis Tage (Wald). Innerhalb des ersten Monats setzen Mikroben 10–15 % des neuen Humus um. Das Potential der Böden, als Kohlenstoffsenke zu fungieren, ist daher begrenzt. Die Stabilität des organischen Kohlenstoffs, also seine molekulare Zusammensetzung, ist daher in Bezug auf den Klimawandel, aber auch hinsichtlich der Anpassungsstrategien der Land- und Forstwirtschaft an den Klimawandel von zentraler Bedeutung (BMLFUW 2012; Eitzinger et al., 2009; Kutsch et al., 2009).

Während bei terrestrischen Bodenformen noch viele Fragen hinsichtlich der Humusdynamik durch sich ändernde Klimabedingungen offen sind, sind sich die ExpertInnen einig, dass Moore (v. a. Hochmoore) höchst empfindlich auf höhere Temperaturen reagieren (Niedermair et al., 2011). Moore haben im Laufe ihrer Entstehung besonders viel Kohlenstoff angereichert. Um ihre Funktion als CO_2-Speicher weiterhin erfüllen zu können, benötigen sie einen ganzjährig hohen Wasserstand. Sinkt dieser ab, dringt Sauerstoff an den Torf, die Temperatur steigt an, und die Moore werden zur CO_2-Quelle (Niedermair et al., 2011).

Gehalte bzw. Vorräte von organischem Bodenkohlenstoff schwanken in einem weiten Bereich und sind abhängig von Standorteigenschaften (Klima, Seehöhe, Relief / Exposition, Durchwurzelungstiefe, Bodenwasserhaushalt, Bodenart und -typ), der Vegetation sowie der historischen und aktuellen Landnutzung. Abschätzungen der organischen Kohlenstoffvorräte in den obersten 50 cm der Böden in Österreich ergaben folgende Reihung: Moore (500 t / ha C) > Wälder (121 t / ha C) > extensives Grünland (119 t / ha C) > intensives Grünland (81 t / ha C) > Ackerland (60 t / ha C) (Gerzabek et al., 2005; Niedermair et al., 2011; Weiss et al., 2000).

Landnutzungsänderungen, z. B. zum Zweck der Siedlungsraumgewinnung, gehören zu den größten anthropogenen Eingriffen in den Kohlenstoffkreislauf terrestrischer Ökosysteme und stellen auch in Österreich eine relevante Größe dar. Insgesamt unterlagen jährlich ca. 0,3–0,5 % (im Zeitraum 1990 bis 2010) der österreichischen Landesfläche einem langfristigen Landnutzungswechsel (Anderl et al., 2012). Die aus Landnutzungsänderungen entstehenden Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) müssen als sogenannte „key category“ mit genau festgelegten Berechnungsmethoden im Rahmen der nationalen Treibhausgasinventur abgeschätzt werden (Anderl et al., 2012). THG-Emissionen aus Umwandlungen von Wald in andere Landnutzungsformen bzw. Kohlenstoffsenken aus Neu- und Wiederbewaldung müssen auch im Rahmen des Kyoto-Protokolls (Art. 3.3) in die Zielerreichung der Emissionsreduktion eingerechnet werden. Mit etwa 1 Mt / Jahr CO_2-Emission (aus Biomasse und Boden) stellen die aus den Umwandlungen von Wald resultierenden Emissionen eine signifikante Größe in der österreichischen Kyoto-Bilanz dar. Dass auch weniger deutliche Veränderungen der Landnutzung einen Einfluss auf den Kohlenstoffhaushalt ausüben, konnten Meyer et al. (2012a, 2012b) am Beispiel aufgelassener Almflächen in Tirol aufzeigen.

Für die Entwicklung der Kohlenstoffgehalte in den Waldböden lassen sich sowohl aus nationalen Berechnungen als auch aus den Daten des EU-Projekts BioSoil (Mutsch et al., 2013) keine eindeutigen Aussagen ableiten. Modellsimulationen ergaben, dass sich der Kohlenstoffvorrat in den Waldböden und der Humusauflage in den letzten drei Jahrzehnten um etwa 0,2 t / ha / Jahr C verringert hat (Anderl et al., 2013). Die Unsicherheit dieser Schätzungen ist jedoch sehr hoch, sodass nicht von einem eindeutigen Trend ausgegangen werden kann.

Landwirtschaftliches Bodenmanagement (Bodenbearbeitung, organische und mineralische Düngung, Management

Tabelle 5.4 Ergebnisse von AGES-Dauerversuchen über die Auswirkungen unterschiedlicher Bewirtschaftungsformen auf den Gehalt an organischem Kohlenstoff im Boden. Quelle: Dersch und Böhm (2001); Spiegel et al. (2007), verändert

Table 5.4 Results of the AGES endurance test showing the impacts of different cultivations on the content of organic carbon in soils. Source: Dersch and Böhm (2001); Spiegel et al. (2007), modified

Langjährige landwirtschaftliche Maßnahmen	Durchschnittliche jährliche Veränderungen an organischem C (t/ha/Jahr C) in 0–25/30 cm Bodentiefe	Anzahl der Versuchsjahre
Optimale mineralische N-Düngung verglichen mit unterlassener N-Düngung	+0,058	36
Einarbeitung der Ernterückstände verglichen mit der Abfuhr	+0,200	17
Zusätzliche Stallmistdüngung	+0,267	21
Minimalbodenbearbeitung (Frässaat) verglichen mit konventioneller Pflugbewirtschaftung	+0,372	21
Kompostanwendung (entsprechend 175 kg N ha^{-1} a^{-1}) verglichen mit N-Mineraldüngung	+0,620 bis +1,400	16
Beregnung	–0,114	21

von Ernterückständen, Fruchtfolge etc.) beeinflusst den organischen Bodenkohlenstoff auf unterschiedlichste Weise (Spiegel, 2012) und kann sowohl zu einer Anreicherung (z. B. Verbleib von Ernterückständen auf dem Feld) als auch zum Abbau (z. B. intensive Bodendurchlüftung und mechanische Zerstörung der Bodenaggregate) beitragen (Gattinger et al., 2012; Leifeld et al., 2013). Menge und Dauer der Kohlenstoffspeicherung im Boden sind auch abhängig von der Art der Kohlenstoffpools und ihrer Stabilität (z. B. Gerzabek et al., 2006; Kögel-Knabner et al., 2008; Bachmann et al., 2008; Ekschmitt et al., 2008; Marschner et al., 2008). Die Änderungen des organischen Bodenkohlenstoffs sind kurz nach der Einführung einer Maßnahme am höchsten (Smith et al., 1997), nach langjährig gleichbleibender Bewirtschaftung stellt sich ein neues Gleichgewicht zwischen Anlieferung und Abbau der organischen Substanz ein. Das zusätzliche Kohlenstoffspeicherungspotential ist begrenzt (Smith et al., 1996; Körschens et al., 2013). In österreichischen Langzeitfeldversuchen (meist > 20 Jahre) der AGES konnten durchschnittliche Änderungen an organischem Kohlenstoff zwischen –0,114 t/ha/Jahr C und 1,40 t/ha/Jahr C festgestellt werden (vgl. Tabelle 5.4). Die Kohlenstoffvorräte der Bezugsvarianten (0–25/30 cm Bodentiefe) lagen – unter anderem in Abhängigkeit vom Standort – zwischen 34,1 und 80,7 t/ha. Die errechneten Veränderungen an organischem Kohlenstoff sind mit den Kohlenstoffsequestrierungsraten anderer Europäischer Ackerböden vergleichbar (Freibauer et al., 2004).

Im Rahmen der Evaluierung von ÖPUL-Maßnahmen hinsichtlich ihrer Klimawirksamkeit wurde berechnet, dass mit ausgewählten humusaufbauenden und düngerreduzierenden Maßnahmen eine durchschnittliche Kohlenstoffänderung in österreichischen Ackerböden von +43 kg/ha/Jahr C für das Jahr 2007 erzielt werden konnte (Freudenschuß et al., 2010). Allerdings ist die Hochrechnung mit einer großen Unsicherheit behaftet. Durch die ÖPUL-Maßnahmen wurde zudem eine Reduktion von N_2O-Emissionen im Ausmaß von 0,5 bis 2,4 % der Gesamtemissionen (CO_2-Äquivalente) ermittelt.

5.3.4 Stickstoffhaushalt

Der Stickstoffhaushalt, also die Nachlieferung, Umwandlung, Speicherung und Rückhaltung von Stickstoff (N), ist eine wesentliche Leistung von Böden in ihrer Funktion als Pflanzenstandort; im Zuge dessen bildet Stickstoff auch die Basis für die Ernährungssicherheit. Da der Stickstoffkreislauf von biologischen Prozessen geprägt wird, die alle temperaturabhängig sind, wirken höhere Temperaturen stimulierend auf die Stickstoffumsetzungen. Global ist eine rasante Beschleunigung des Stickstoffkreislaufs zu beobachten (Galloway, 2002), wobei der Mensch darauf direkt durch die Freisetzung reaktiver Stickstoffverbindungen und indirekt über den Klimawandel Einfluss nimmt.

Pflanzen brauchen Stickstoff nicht nur für ihr Wachstum, sondern er spielt auch eine wesentliche Rolle in fast allen pflanzlichen Prozessen (Schilling, 2000). Stickstoff wird in der landwirtschaftlichen Produktion teilweise nur ineffizient genutzt (z. B. bei hohem Stickstoffangebot zum Zeitpunkt geringen Stickstoffbedarfs; so nutzen Getreidearten beispielsweise lediglich etwa 30 % des Stickstoffdüngers für ihr Wachstum), so wird etwa weltweit trotz geringeren Bedarfs jährlich ca. 90 Mio. t Stickstoffdünger ausgebracht (Schilling, 2000). Die-

se Düngepraxis ist nicht nur ökonomisch verschwenderisch, sondern auch umweltschädlich: Stickstoffeutrophierung von Wasserwegen ist weltweit ein steigendes Problem (Schilling, 2000). Stickstoffdüngung trägt auch wesentlich zur Emission des Treibhausgases N_2O bei, dessen Treibhauspotential fast 300 Mal höher ist als jenes von CO_2 und dadurch mit einem Anteil von mehr als 5 % zum menschlich verursachten Treibhauseffekt beiträgt (IPCC, 2001a).

Es besteht kein Zweifel daran, dass die anthropogene Produktion von reaktiven Stickstoffverbindungen (N_r) die landwirtschaftliche Produktivität verbessert hat. Ohne diese könnte ein Hektar fruchtbarer landwirtschaftlicher Boden in Österreich ca. zwei Tonnen Getreide / ha / Jahr hervorbringen, sofern keine anderen wachstumslimitierenden Faktoren vorherrschen. Mit Düngereinsatz ist die Produktion von acht bis zehn Tonnen Getreide / ha / Jahr möglich (Sutton et al., 2011). Synthetische Stickstoffverbindungen tragen über ihre Auswirkungen auf die Produktivität in der landwirtschaftlichen Produktion etwa 50 % zur Ernährung der Weltbevölkerung bei. Die Effizienz der landwirtschaftlichen Produktion in Abhängigkeit von der Stickstoffdüngung kann als Indikator für den Nutzen des Einsatzes von N_r herangezogen werden (kg Ernteprodukt pro kg eingesetztem Stickstoff). In Abhängigkeit von den Marktpreisen des Getreides und des Mineralstickstoffs kann pro in N_r-Dünger investiertem Euro ein finanzieller Gewinn von zwei bis fünf Euro erzielt werden (Sutton et al., 2011). Aus dieser Berechnung ergibt sich auch die Stickstoffnutzungseffizienz. Diese liegt in Europa im Schnitt bei 30 % (Sutton et al., 2011). Hier gibt es noch Potenzial für Verbesserungen, die aber nur unter stabilen Klimabedingungen, die das Pflanzenwachstum fördern, verwirklicht werden können. Verschlechtert sich die Stickstoffnutzungseffizienz, so sind nicht nur Ertragseinbußen, sondern auch negative Umwelteffekte die Folge.

Die Ankurbelung des Stickstoffkreislaufs und folglich die Anreicherung von N_r in der Umwelt bringt Probleme für Gewässer und für natürliche Ökosysteme mit sich; auch zahlreiche negative Nebenwirkungen auf die Bodenqualität können die Folge sein (Velthof et al., 2011). Gerade anhand von Böden wird die Komplexität der N_r-Effekte und ihrer vernetzten Natur sichtbar. So sind die wesentlichen Folgeerscheinungen der N_r-Eutrophierung von Waldböden der Versauerungseffekt, die daraus resultierende Veränderung der organischen Bodensubstanz („soil organic matter“ – SOM) und der Verlust der Bodenbiodiversität (Velthof et al., 2011). Bodenversauerung kann sowohl durch den Einfluss von oxidierten als auch von reduzierten N_r-Verbindungen stattfinden, die jeweils als Folge von NO_x- und NH_3-Emissionen aus Verbrennungsprozessen bzw. intensiver Viehhaltung mit dem Niederschlag in den Boden kommen. Daraus können negative Effekte auf das Waldwachstum und eine Auswaschung von Schwermetallen resultieren. Man geht davon aus, dass die Bodenversauerung in Europa innerhalb der nächsten Dekaden aufgrund der Reduktion der SO_2- und NO_x-Emissionen verlangsamt werden kann. Hingegen werden sich die NH_3-Emissionen nur geringfügig vermindern; sie werden in Zukunft hauptverantwortlich für die Bodenversauerung sein (Velthof et al., 2011).

In Mooren können hohe Eintragsraten von N_r das Kohlenstoffspeichervermögen beeinträchtigen und zur Veränderung der Vegetationsgesellschaften bzw. zum Verlust von geschützten, an Nährstoffarmut angepassten Pflanzenarten führen (Velthof et al., 2011).

In landwirtschaftlichen Böden steigert N_r die Bodenfruchtbarkeit und erhöht den Anteil der organischen Bodensubstanz. Einige Bodenpilze und stickstofffixierende Bakterien werden jedoch durch eine gesteigerte Stickstoffverfügbarkeit gehemmt. Es gibt zahlreiche Interaktionen zwischen Stickstoff und der Biodiversität in Böden. Studien in Europäischen Wäldern zeigen die Zunahme eines bakteriellen Stressindikators und eine Abnahme des Pilz-Bakterien-Verhältnisses mit erhöhten N_r-Einträgen (z. B. Zechmeister-Boltenstern et al., 2010). Generell kann man davon ausgehen, dass an nährstoffarme Bedingungen angepasste Bodenorganismen wie v. a. Pilzbasierte Nahrungsketten mit einer Vielzahl an Collembolen (Springschwänzen), Milben und Enchytraeiden (Kleinringelwürmern) mit zunehmender Eutrophierung abnehmen, während auf Bakterien basierte Nahrungsketten tendenziell zunehmen (Wardle et al., 2004).

Laut Food and Agricultural Organisation (FAO) stellt in gemäßigten Breiten die Stickstoffeutrophierung global die größte Bedrohung für die Biodiversität im Allgemeinen dar (Sala et al., 2000), d. h. die Stickstoffeutrophierung ist stärker wirksam als der Klimawandel, aber indirekt von ihm abhängig. Die Bodenbiodiversität ist in erster Linie durch Landnutzungsänderungen gefährdet (Bunning und Jimenez, 2003), gefolgt von erhöhten CO_2-Konzentrationen und invasiven Arten. Im Vergleich zu den angeführten globalen Veränderungen ist der Temperaturanstieg in diesem Zusammenhang weniger relevant, kann aber zu Veränderungen der mikrobiellen Gemeinschaft und damit auch des Stickstoffhaushalts führen (Mele, 2011).

Der Klimawandel wirkt sich sowohl auf den Stickstoffhaushalt des Bodens als auch auf die Stickstoffnutzungseffizienz der Pflanzen aus. So beschleunigen steigende Temperaturen die Bodenprozesse der Stickstoffmineralisierung und der Nitrifikation; Trockenheit hat hingegen die gegenteilige Wirkung (Groffman et al., 2009). Aus Studien in semiariden Gebieten lässt sich schließen, dass Stickstoffmineralisierung und -immo-

bilisierung (also Freisetzung versus Festlegung) bei Bodentemperaturen über 20 °C nicht mehr eng aneinander gekoppelt sind, was ein hohes Risiko für Stickstoffverluste in Form von Nitrat bedeutet (Bijay-Singh, 2011). Nitrat kann aus dem Boden verloren gehen durch Auswaschung oder durch Ausgasung in Form des Treibhausgases N_2O. Erwärmung, erhöhte CO_2-Konzentration und Extremwetterereignisse (Dürre, Starkniederschläge) zeigen zahlreiche Wirkungen auf die THG-Emissionen, wobei Stickstoff diese Wirkungen verstärken kann (vgl. Band 3, Kapitel 2).

Hinweise auf eine Verbesserung der Stickstoffnutzungseffizienz von Waldbäumen in Kombination mit erhöhten CO_2-Gehalten in der Atmosphäre konnten nicht bestätigt werden. Vielmehr zeigte sich, dass sich nur die Stickstoffaufnahme von Wäldern der gemäßigten Breiten erhöht und so zu einer gesteigerten Produktivität der Wälder führt (Finzi et al., 2007). In vielen Fällen hat allerdings die Stickstoffdeposition einen wesentlichen Einfluss auf die Bodenkohlenstoffspeicherung infolge erhöhter Bildung von Nadel- und Blattmasse und erhöhtem Streufall sowie einer langsameren Umsetzung organischen Materials. Knorr et al. (2005) fanden bei Stickstoffeinträgen von 5 bis 10 kg / ha / Jahr verringerte, bei Werten unter 5 kg / ha / Jahr erhöhte Streuabbaugeschwindigkeiten. Die Netto-Kohlenstoffakkumulation in Waldböden hängt schlussendlich davon ab, ob der fortschreitende Humusabbau oder erhöhte Stickstoffeinträge mit erhöhter Biomasse- und Streuproduktion überwiegen. De Vries et al. (2009) und Reay (2007) stellen übereinstimmend fest, dass pro kg Stickstoffeintrag zwischen 5 und 35 kg Kohlenstoff in Waldböden gespeichert werden.

Ergebnisse eines Inkubationsversuchs von Linke et al. (2004), bei dem eine Erhöhung der CO_2-Konzentration in Kombination mit einer Temperaturerhöhung um 3 °C simuliert wurden, zeigten eine Steigerung der Photosyntheseleistung von Hartweizen, wobei Wassermangel und geringe Stickstoffversorgung diesen Effekt wieder aufhoben. Es stellt sich die generelle Frage, ob die verschiedenen Einflüsse des Klimawandels aufgrund ihrer Komplexität eine wechselseitige Verstärkung oder, wie von Leuzinger et al. (2011) postuliert, eine Überlagerung und eine gegenseitige Aufhebung von positiven und negativen Effekten bewirken. Luo und Weng (2011) sprechen von der Gefahr von Schwellenwerten und kritischen Punkten, bei deren Erreichen es zur Destabilisierung von Systemen kommen kann. Dementsprechend könnte es durch kombinierte Klimawandeleffekte (z. B. Temperaturerhöhung bei gleichzeitiger Trockenheit) entweder zur Neutralisierung von positiven und negativen Effekten auf die Stickstoffnutzungseffizienz kommen oder aber zur Destabilisierung und damit zu einer Beeinträchtigung des Stickstoffhaushalts von Böden mit hohen Stickstoffverlusten führen.

5.4 Einfluss des Klimawandels auf Böden in Abhängigkeit von deren Nutzung
5.4 Climate change impact on soils depending on land use

Bei der Betrachtung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Böden müssen deren vielfältige Ausprägungen berücksichtigt werden. Dabei spielen einerseits die Bodentypen als Ausdruck der bodenbildenden Faktoren wie Gestein, Relief, Klima und Vegetation eine wesentliche Rolle. Andererseits sind viele der Böden aufgrund spezifischer Nutzungsformen bereits anthropogen überprägt. Dementsprechend kommt gerade auch diesem Faktor eine besondere Rolle zu. Im Folgenden werden die Besonderheiten der Böden Österreichs, bezogen auf deren Nutzung, in Bezug auf den Klimawandel thematisiert.

5.4.1 Ackerböden

Ackerböden werden zeitlich begrenzt – zumeist für die Dauer einer Vegetationsperiode – mit Kulturpflanzen (Getreide, Hackfrüchte etc.) bebaut. Die einzelnen Kulturen (Arten und Sorten) können unterschiedlich auf Änderungen von Klima- und Witterungsparametern reagieren, zum Teil auch in Abhängigkeit vom Photosynthesetyp (C_3-Pflanzen wie Getreide, Kartoffel, Zuckerrübe verglichen mit C_4-Pflanzen wie etwa Mais und Hirse) (Eitzinger et al., 2009). Eine erhöhte CO_2-Konzentration in der Atmosphäre kann die pflanzliche Biomassebildung fördern. Dagegen führen Wassermangel, Hitzestress, hohe Ozonbelastungen, höhere UV-B-Strahlung in unterschiedlichem Ausmaß zur Verminderung der Produktqualität und zu Ertragseinbußen bei Kulturpflanzen (Eitzinger et al., 2009). Letztere haben auch eine verminderte Zufuhr an organischer Substanz über Ernte- und Wurzelrückstände zur Folge (vgl. Abschnitt 5.3.3).

Temperatur und Wasserangebot steuern Abbau- und Umsatzprozesse der organischen Substanz im Boden. Für diese sind organisch gebundener Kohlenstoff und Stickstoff von wesentlicher Bedeutung; mikrobiologisch gesteuerte Umsetzungsprozesse von Kohlen- und Stickstoff sind eng miteinander verknüpft. Von einer Änderung des Temperatur- und Wasserregimes ist daher vor allem auch die Umsetzung von Stickstoff und anderen Nährstoffen betroffen. So berichten Rustad et al. (2001, zitiert nach Bijay-Singh, 2011), dass eine Temperaturerhöhung zu einer Erhöhung der Stickstoffmine-

ralisierung in terrestrischen Ökosystemen führte. Dies könnte Stickstoffengpässen, die mit einer Erhöhung der pflanzlichen Biomassebildung in Zusammenhang stehen, entgegenwirken (Hovenden et al., 2008).

Da Nährstoffe nur in gelöster Form (z. B. in Ionenform) aus der Bodenlösung in die Pflanze aufgenommen werden, hat Wassermangel eine verminderte Aufnahme von Nährstoffen zur Folge. Dies muss insbesondere bei Ackerkulturen bei der Mengenbemessung der Stickstoffdüngung beachtet werden, da Stickstoff normalerweise der am meisten ertragsbegrenzende Faktor ist und auch die Produktqualität (z. B. Rohproteingehalt von Getreide) wesentlich beeinflusst (Mengel et al., 2001). Die Stickstoffdüngeempfehlung für die Landwirtschaft basiert in erster Linie auf Richtwerten, wobei die Ertragslage eine wesentliche Rolle spielt und auch Bodendauereigenschaften (Gründigkeit, Bodenschwere, Wasserverhältnisse, Grobanteil) und das standörtliche Stickstoffmineralisationspotenzial einbezogen werden können (BMLFUW, 2006; Spiegel et al., 2006). Eine unzureichende Wasserversorgung, insbesondere in kritischen Entwicklungsstadien der Kulturen, z. B. zwischen Schossen und Milchreife bei Getreide, kann dazu führen, dass eine Düngerbemessung in Erwartung des normalerweise erreichbaren Ertrages nicht genutzt werden kann (geringe Stickstoffnutzungseffizienz) oder sogar zu Ertragsminderungen führt (Dersch, 1994). Eine Abnahme der Niederschläge kann in Gebieten mit intensiver landwirtschaftlicher Produktion – wie etwa in Ostösterreich – durch Bewässerung kompensiert werden. Allerdings ist durch die negative Wasserbilanz die Gefahr gegeben, dass es zu Versalzungsphänomenen kommt.

Stickstoffdüngung führt zur Emission von N_2O, die derzeit nach IPCC (1997) mit einem Emissionsfaktor von 1,25 % der Stickstoffzugabe durch Stickstoffdüngung berücksichtigt werden. In den 2006 überarbeiteten Guidelines wurde dieser Faktor auf 1 % herabgesetzt (IPCC, 1997 und 2006). Da N_2O ca. 300 Mal klimawirksamer ist als CO_2, wird es als ein wesentlicher Verursacher des Klimawandels genannt, und jede Erhöhung von N_2O-Emissionen, insbesondere durch unsachgemäß hohe Stickstoffdüngung, sollte vermieden werden. Geht diese nämlich über das Optimum hinaus, kann dies neben N_2O-Emissionen auch zu NO_3-Auswaschung ins Grundwasser und zu weiteren umwelt- und auch klimarelevanten gasförmigen Stickstoffverlusten (Ammoniak und elementarer Stickstoff nach Denitrifikation) führen. Daher ist für eine Bewirtschaftung von Ackerböden unter den Rahmenbedingungen des Klimawandels eine möglichst genaue Bemessung der Stickstoffdüngung von besonderer Bedeutung. Zu diesem Zweck können analytische Methoden wie die Berücksichtigung des Gehalts an Nitrat- und Ammoniumstickstoff (N_{min}) zu Vegetationsbeginn oder vor Anbau für eine Abschätzung des Mineralisationspotenzials durch die anaerobe Bebrütungsmethode oder die Chlorophyllmessung (Blattanalyse) verwendet werden (Diepenbrock et al., 2009; Spiegel et al., 2009). Wesentlich ist auch eine realistische Einschätzung der Ertragslage und der Berücksichtigung der konkreten vorangegangenen Witterung (Dersch, 2007). Die Anwendung von stabilisierten Stickstoffdüngern könnte dazu beitragen, die Stickstoffnutzungseffizienz zu erhöhen und somit N_2O-Emissionen zu verringern (z. B. Menendez et al., 2012; Hillier et al., 2012).

Durch die Zunahme von extremen Witterungsereignissen (Starkregen, starke Winde) kann insbesondere bei unvollständiger oder fehlender Bodenbedeckung von Ackerböden die Erosion durch Wasser und Wind zunehmen (Eitzinger et al., 2009; vgl. Abschnitt 5.5.1). Reduzierte oder konservierende Bodenbearbeitungen vermindern den Bodenabtrag um etwa 70 %, den Stickstoffaustrag um 55 % und den Phosphoraustrag um 70 % (Klik, 2003). Bodenschonende Bewirtschaftung durch Reduzierung der Bodenbearbeitungshäufigkeit und -tiefe kann zur langfristigen Erhaltung der organischen Substanz im Boden beitragen (Spiegel et al., 2007 und 2010).

Zusammenfassend ist festzustellen, dass unter den Veränderungen des Klimawandels ein optimales Bodenmanagement zunehmend wichtig wird. Dies betrifft insbesondere eine standortspezifische Anpassung der Fruchtfolgen, optimales Wasserhaushaltmanagement und eine humusschonende Bodenbearbeitung sowie Art, Menge und Ausbringung von organischen und mineralischen Düngemitteln. Insbesondere ist auf eine Erhöhung der Stickstoffnutzungseffizienz durch Vermeidung zu hoher Stickstoffdüngemengen und eine Düngung, die auch zeitlich auf den Nährstoffbedarf der Pflanze abgestimmt ist, zu achten.

5.4.2 Grünlandböden

Das Dauergrünland nimmt in Österreich eine Fläche von ca. 1 342 500 ha ein (BMLFUW, 2011). Dies entspricht 16 % der Gesamtfläche Österreichs oder 57 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche. Die Böden des Dauergrünlandes haben somit flächenmäßig in weiten Teilen von Österreich eine große Bedeutung. In Österreich dominiert das Dauergrünland in jenen Gebieten, wo der Jahresniederschlag im langjährigen Durchschnitt 900 mm oder mehr beträgt und / oder die Jahresmitteltemperaturen unter 7–8 °C liegen. In diesen Gebieten sind für die Vegetation die niedrigen Lufttemperaturen und die kurze Vegetationsperiode die begrenzenden klimatischen Faktoren. Eine Erhöhung der Lufttemperatur und eine Verlängerung der Vegetationsperiode, die mit dem Klimawandel zu

Tabelle 5.5 Kohlenstoffgehalt und Kohlenstoffvorrat in Böden des Dauergrünlandes (A-Horizont, 0–10 cm Bodentiefe) in Abhängigkeit von der Wasserhaushaltsstufe. Quelle: Bohner (2012)

Table 5.5 Carbon content and carbon stocks in soils of permanent grassland (A-horizon, 0–10 cm depth) according to the soil moisture status. Source: Bohner (2012)

	C_{org} (%)				C_{org} (kg / ha)			
	halbtrocken	frisch	feucht	nass	halb-trocken*	frisch*	feucht*	nass**
n	32	463	146	138	32	463	146	138
Minimum	2,7	2,1	2,0	3,8	27 200	21 324	19 800	19 200
Maximum	10,1	18,4	44,1	53,3	101 200	184 400	441 000	266 350
Arithmetischer Mittelwert	6,8	6,6	9,7	32,5	67 700	65 800	97 400	162 550
Median	6,6	6,2	8,2	36,2	66 300	62 209	81 700	181 200

*Annahme: Lagerungsdichte = * 1 g / cm³ bzw. ** 0,5 g / cm³; n = Anzahl der Bodenanalysen*

erwarten sind, werden daher in kühleren und niederschlagsreicheren Grünlandgebieten zu natürlichen und anthropogenen Veränderungen im Pflanzenbestand führen. Das Ertragspotenzial der Grünlandflächen wird zunehmen, folglich ist auch eine Nutzungsintensivierung (frühere und häufigere Mahd, längere und stärkere Beweidung) zu erwarten. Vor allem in Bergregionen ist aufgrund der Geländemorphologie (häufig steile Hanglagen) allerdings eine großflächige Umwandlung von Dauergrünland in Ackerland wenig wahrscheinlich. In wärmeren, niederschlagsärmeren und meist vom Ackerbau dominierten Gebieten hingegen dürfte auf Grund des zunehmenden Trocken- und Hitzestresses das Ertragspotenzial im Grünland sinken (Eitzinger et al., 2009).

Klimatische Veränderungen werden sich mehr oder weniger stark vor allem auf die Bewurzelung, den Humusgehalt und die Struktur im Oberboden von Grünlandböden direkt und indirekt auswirken. Während sich die Bewurzelung und die Bodenstruktur kurzfristig verändern können, sind beim Humusgehalt nur langfristig klimabedingte Veränderungen möglich. Unter Dauergrünland sind nahezu alle in Österreich vorkommende Bodentypen anzutreffen. Die Grünlandvegetation liefert in der Regel leicht abbaubare Bestandesabfälle. Durch die rasche Zersetzung der abgestorbenen Pflanzenteile und deren sofortige Einmischung in den Mineralboden durch Bodentiere kommt es auf regelmäßig bewirtschafteten Grünlandböden im Allgemeinen zu keiner bedeutenden Anreicherung von Auflagehumus. Die Böden des Dauergrünlandes weisen im Oberboden (A-Horizont) in der Regel hohe Humusgehalte auf (vgl. Tabelle 5.5). Die ganzjährige und weitgehend geschlossene Grünlandvegetation schützt vor Erosion (Bohner, 2012).

Die räumliche Wurzelverteilung und die Durchwurzelungstiefe im Boden werden ebenfalls vom Klima beeinflusst (Lichtenegger, 1997). Generell fördern Trockenheit und Wärme das Tiefenwachstum der Wurzeln, während Nässe und Kälte das Tiefenstreben hemmen. In wärmeren Gebieten erreichen die Wurzeln der Gräser auf frischen Standorten Tiefen bis über 1 m, einige Kräuter sogar bis über 2 m. In kühleren Gebieten hingegen dringen die Graswurzeln kaum noch tiefer als 50 cm in den Boden ein, und die Kräuter erreichen selten eine Wurzeltiefe von über 1 m (Lichtenegger, 1997). Somit kann in kühleren und niederschlagsreicheren Grünlandgebieten die Erwärmung auf den extensiv bis mäßig intensiv genutzten Grünlandflächen einen größeren Wurzeltiefgang bewirken. Eine tieferreichende Durchwurzelung erhöht den Humusgehalt im Unterboden und vermindert die Nährstoffverluste durch Auswaschung mit dem Sickerwasser. Außerdem werden die Wasser- und Nährstoffvorräte im Unterboden besser ausgenützt.

In Tabelle 5.5 sind Kohlenstoffgehalt und Kohlenstoffvorrat in den Böden des Dauergrünlandes in Abhängigkeit von der Wasserhaushaltsstufe dargestellt. Die Böden des Dauergrünlandes weisen im Oberboden in der Regel hohe Humusgehalte auf. Allerdings schwanken die organischen Kohlenstoffgehalte in den obersten 10 cm in Abhängigkeit vom Standort, dem Bodenwasserhaushalt und der Nutzung in einem weiten Bereich; der Median beträgt in den einzelnen Wasserhaushaltsstufen mehr als 6 % C_{org}. Die Böden des Dauergrünlandes sind bedeutende Speicher von organischem Kohlenstoff. Sie enthalten in den obersten 10 cm als Median etwa 60 000 bis weit über 100 000 kg / ha C_{org}.

Der Humusgehalt kann durch den Klimawandel sowie durch eine unterschiedliche Art und Intensität der Grünlandbewirtschaftung nur langfristig innerhalb verhältnismäßig enger Grenzen verändert werden. Er ist im Grünlandboden im Allgemeinen umso höher, je niedriger die Bodentemperatur und je höher die Bodenfeuchte

während des Jahres ist (Bohner, 2012). Eine Nutzungsintensivierung vermindert die Wurzelmasse und erhöht die mittlere Bodentemperatur im Oberboden (Bohner und Herndl, 2011). Eine durch den Klimawandel verursachte Nutzungsintensivierung kann daher langfristig zu einer geringen Abnahme des Humusgehaltes im Boden führen.

Die krümelige oder körnige Struktur (bei tonreichen Böden) ist typisch für die Oberböden des extensiv genutzten Dauergrünlandes. Eine Nutzungsintensivierung (häufigeres Befahren, stärkere Beweidung) führt zu einer Oberbodenverdichtung und Strukturveränderung (Bohner, 2012). Verdichtete Oberböden weisen in Hanglage infolge verminderter Infiltration von Regen- und Schneeschmelzwasser einen erhöhten Oberflächenabfluss sowie eine geringere Infiltration der flüssigen Wirtschaftsdünger (Gülle, Jauche) auf. Dies verstärkt das Risiko für Nährstoffausträge in die Oberflächengewässer durch Abschwemmung (Bohner et al., 2012). Verdichtete Grünlandböden können durch eine Erhöhung des Oberflächenabflusses bei Starkregen auch Hochwasser fördern; sie weisen vor allem bei häufiger Staunässe und reichlicher Düngung erhöhte N_2O-Emissionen auf (Sitaula et al., 2000).

5.4.3 Waldböden

Wald nimmt in Österreich nach der Österreichischen Waldinventur (ÖWI) 2007/09 eine Fläche von 3,99 Mio. ha ein (BFW, 2011). Dies entspricht 47,6 % der Gesamtfläche. Seit der Inventurperiode 1961 bis 1970 der ÖWI hat die Waldfläche um etwa 300 000 ha zugenommen, seit 1913 geht man von einer Zunahme der Waldfläche in Österreich von rund 800 000 ha aus (Katzensteiner und Englisch, 2007). Das heißt, dass ca. 20 % des Waldbodens kürzer als die Dauer einer Umtriebszeit unter forstlicher Nutzung stehen.

Während die Siedlungstätigkeit des Menschen und die landwirtschaftliche Nutzung sich auf die relativ günstigen Flächen beschränken, bleiben Ungunstlagen dem Wald vorbehalten (vgl. Band 2, Kapitel 3). Nährstoff- und Wasserkreislauf von Waldböden unterscheiden sich deutlich von Böden unter Acker- und Grünlandnutzung. Das Verhältnis von oberirdischer Biomasse zur Nettoprimärproduktion (NPP) ist wesentlich weiter als z. B. in Grünland oder Savannen, wodurch große Mengen an Kohlenstoff und Nährstoffen über Jahrzehnte bis Jahrhunderte in der Biomasse gebunden sind. Der Bestandsabfall (Streu und verholztes Material) führt oft zur Entwicklung einer organischen Auflage. Typisch für Waldböden sind hoher Humusgehalt, geringere Basensättigung, niedrigere pH-Werte und niedrige Lagerungsdichten. Hohe Porosität und Leitfähigkeit bewirken deutliche Unterschiede der funktionellen Eigenschaften von Waldböden gegenüber landwirtschaftlichen Böden (Fisher und Binkley, 2000).

Aufgrund dieser funktionellen Besonderheiten sind Einflüsse des Klimawandels nicht nur in Bezug auf den Waldboden allein, sondern auf das jeweilige Waldökosystem zu betrachten. Neben direkten Klima- und Witterungseinflüssen werden im Folgenden auch indirekte Einflüsse wie z. B. Veränderungen von Ökosystemgrenzen, veränderte Störungsregime und energiepolitisch bedingte Veränderungen der Bewirtschaftung diskutiert.

Ein Rückgang der Intensität der Landnutzung und klimatisch günstigere Bedingungen wie anhaltender Temperaturanstieg (vgl. Band 1, Kapitel 3 und 4; Böhm, 2010) und Veränderung der phänologischen Jahreszeiten (Menzel und Fabian, 1999) fördern die Wiederbewaldung ehemaliger Almflächen in der subalpinen Stufe und den Anstieg der Waldgrenze (vgl. Band 2, Kapitel 3; Leonelli et al., 2011). Bei gleichem Niederschlagsangebot sind Böden unter Wald oder unter alpinen Zwergsträuchern aufgrund der hohen Interzeptions- und Transpirationsleistung der Bestände in der Regel deutlich aufnahmefähiger als Böden unter kurzwüchsigen Vegetationsformen. Als Folge der intensiven Durchwurzelung ist in Waldböden der Anteil an Sekundärporen im Vergleich zu umgebenden Nichtwaldflächen in der Regel höher (Whipkey, 1962). Der Anteil des von der Baumvegetation über die Wurzeln aufgenommenen und über die Nadeln oder Blätter an die Atmosphäre abgegebenen Wassers ist doppelt bis viermal so hoch wie z. B. von kurzwüchsigen alpinen Rasen (Markart et al., 2011). Das Aufnahmevermögen der von der Sukzession zu Wald bzw. alpiner Zwergstrauchheide betroffenen Böden könnte sich daher in der hochmontanen bis subalpinen Stufe künftig verbessern, sofern nicht negative Effekte wie z. B. sekundäre Vernässung aufgrund extensivierter Be- und Entwässerungssysteme die Infiltrationskapazität und Speicherleistung auf großer Fläche herabsetzen.

Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Oberflächenabfluss bei Starkregen ist mit Ausnahme von vernässten und sehr bindigen Böden unter Wald deutlich geringer als auf waldfreien Flächen (Bunza et al., 1996). Hochwasserspitzen treten in bewaldeten Einzugsgebieten verzögert und auf niedrigerem Niveau auf (Cosandey, 2005). Beobachtungen nach natürlichen Starkregenereignissen und Resultate von Starkregensimulationen lassen erkennen, dass Waldböden auch bei hohen Niederschlagsmengen und -intensitäten meist später die Grenze ihrer Aufnahmekapazität erreichen (Bunza et al., 1996; Markart et al., 1997; Markart et al., 2007). Diese positiven Eigenschaften von Waldböden könnten unter den von Böhm (2010) skizzierten klimatischen Aussichten für Öster-

reich bis zum Jahr 2100 noch größere Bedeutung erlangen.

Ein Effekt der Landnutzung zeigt sich u.a. darin, dass durch die Neubewaldung der Kohlenstoffvorrat der Böden zunimmt. Diese Auswirkungen sind besonders stark bei der Aufforstung von Ackerland und etwas weniger bei Grünland ausgeprägt. Die Rolle der Wiederbewaldung auf Gebirgsböden ist noch nicht abschließend beurteilt. Besonders unter Zwergstrauchheiden bilden sich sehr humusreiche Böden, deren organische Substanz schwer abbaubar ist (Larcher, 1977; Wieser und Tausz, 2007). Bei einer Wiederbewaldung wird die Humusform verändert; möglicherweise wird auch der Kohlenstoffpool des Bodens vermindert (vgl. Abschnitt 5.3.3). Dieser mögliche Kohlenstoffverlust kann aber durch den Aufbau von Waldbiomasse ausgeglichen werden.

Die Häufigkeit von Störungen in Waldökosystemen des Alpenraums hat in den letzten Jahren zugenommen (Steyrer und Krehan, 2011). So fanden etwa Seidl et al. (2011) heraus, dass Störungen durch Windwurf, Waldbrand oder Borkenkäfer, die indirekt auch zu erheblichen Störungen der Wasser- und Nährstoffkreisläufe des Bodens führen, einerseits zwar vom Klima stark abhängig sind, andererseits aber auch vom Wandel in der Forstwirtschaft, etwa von häufig bevorzugten Nadelbaumarten und von der europaweit zu beobachtenden Steigerung der Holzvorräte pro Flächeneinheit beeinflusst werden. Die erwartete Zunahme und Intensität von Trockenperioden (IPCC, 2007) kann vor allem auf grobtexturierten und flachgründigen Böden (z.B. in den Kalkalpen oder im kontinentalen Osten) Probleme in der Wasserversorgung aufwerfen. So wurden nach dem „Jahrhundertsommer" 2003 von Minerbi et al. (2006) Trockenschäden an Rotföhren (*Pinus sylvestris*) auf durchlässigen Böden im Südtiroler Eisacktal festgestellt. Viele der geschädigten Bäume wiesen dabei allerdings bereits eine Vorschädigung durch den Trockensommer 1976 auf.

Einen oftmals nur lokalen Sonderfall stellen Böden dar, die durch Brandereignisse beeinflusst worden sind. Dass es bei einer Zunahme von sommerlichen Trockenphasen vermehrt zu solchen Ereignissen kommen wird, zeigen Vacik et al. (2011) am Beispiel der Sommer 2003 und 2006. Auf steilen Flächen in den Alpen kann im Extremfall nach Brandereignissen die Vegetation so stark geschädigt sein, dass intensive und lang anhaltende Erosionsprozesse auftreten. Untersuchungen von Sass et al. (2012) anhand historischer Brandereignisse belegen, dass im ungünstigsten Fall nur noch der Fels bzw. das Lockergestein übrig bleiben und es auch nach Jahrzehnten kaum zu einer Wiederbesiedlung der Flächen kommt. Aber auch bei moderateren Brandereignissen werden die Böden in struktureller und chemischer Hinsicht verändert (Kloss et al., 2012). Im Gegensatz zu Feuereinwirkungen, bei denen der Mineralboden freigelegt werden kann, bleibt bei der Holznutzung der Boden bedeckt, der Bestandesabfall verbleibt im Bestand, Nährstoffverluste, Abfluss- und Erosionsdisposition sind daher geringer (Cosandey et al., 2005).

Bis zur ausreichenden Wiederbewaldung nach Störungen ist aufgrund der hohen kinetischen Energie des Niederschlages bei Starkregen mit hohen Abflussraten zu rechnen (Bunza et al., 1996). Die reduzierte Bodendeckung resultiert in der Regel in höheren Erosionsraten als Folge des Splash-Erosion-Effektes und der damit verbundenen Zerstörung von Bodenaggregaten (Ghadir und Payne, 1988; Fox et al., 2007).

Die Untersuchungsergebnisse über Auswirkungen von letztendlich klimabedingten Störungen auf den Kohlenstoffhaushalt von Waldböden sind widersprüchlich. Don et al. (2012) fanden in der Hohen Tatra keine signifikante Abnahme der Kohlenstoffspeicherung im Boden. Hollaus et al. (2012) zeigen hingegen im Projekt SicAlp[2] gravierende Humusverluste nach Windwurf und Käferkalamitäten auf Humuskarbonatböden. Durch erhöhte CO_2-Freisetzung in der Kahlphase können solche Flächen über Jahre eine CO_2-Quelle darstellen. Die Wiederbewaldung dauert auf diesen Standorten oft Jahre bis Jahrzehnte (Pröll und Katzensteiner, 2012). Neben verstärkter Erosion führt die Temperaturerhöhung des Bodens zu einer massiven Erhöhung der heterotrophen Bodenrespiration und damit zu Rückkopplungseffekten auf die Atmosphäre (Mayer und Katzensteiner, 2012).

Die Erreichung der Vorgaben der Directive 2009/28/EC und des National Renewable Energy Action Plan 2010 (CEC, 2010) lässt eine Intensivierung der Nutzung von Biomasse aus dem Wald erwarten (Katzensteiner et al., 2013). Diese kann die Produktivität nachhaltig vermindern (Winiwarter et al., 2012). Die Auswirkungen intensivierter Nutzung auf den Kohlenstoffhaushalt von Waldböden sind noch nicht ausreichend untersucht. Eine starke Beeinträchtigung von Waldböden stellt der unkontrollierte flächige Einsatz schwerer Erntemaschinen bei Nutzungen dar, die den Bodenwasserhaushalt und den Gaswechsel besonders auf schweren oder biologisch wenig aktiven Böden jahrzehntelang beeinträchtigen können (vgl. Box 5.2; Hildebrand, 1987; Katzensteiner et al., 2013).

5.4.4 Böden oberhalb der Waldgrenze

Gebirgsböden weisen einige Besonderheiten auf, die mit den stark unterschiedlich ausgeprägten bodenbildenden Faktoren und deren kleinräumigem Wechsel zusammenhängen. Zudem

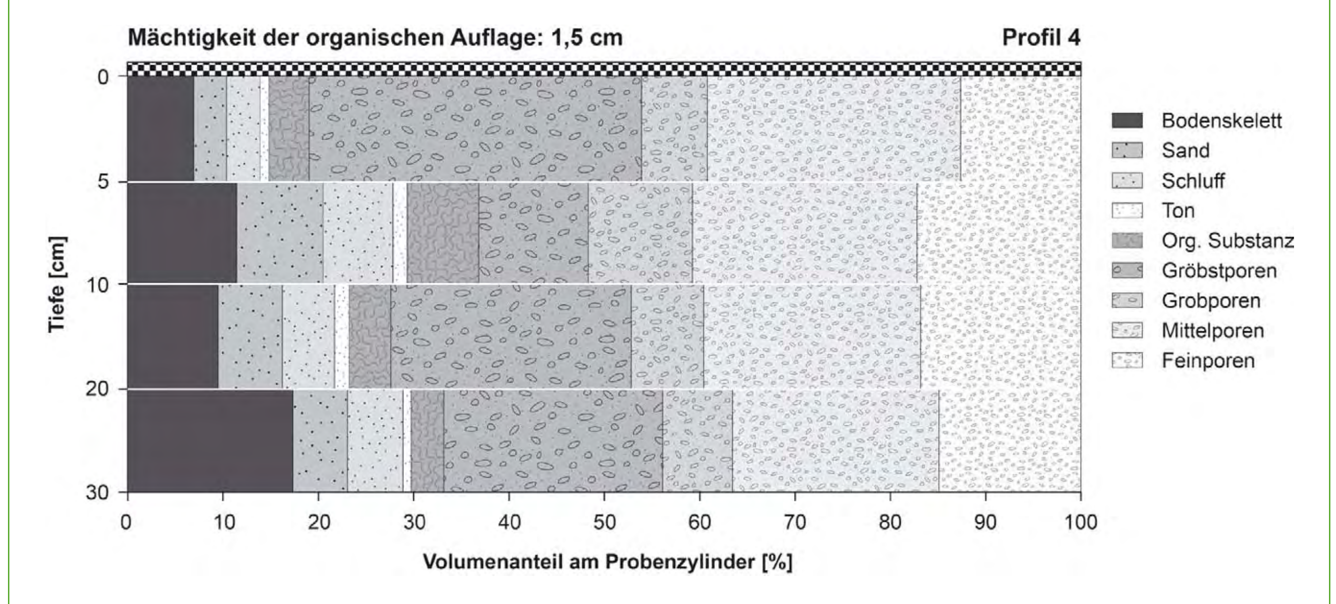
[2] https://forschung.boku.ac.at/fis/suchen.projekt_uebersicht?sprache_in=de&menue_id_in=300&id_in=8005

Box 5.2: Beispiele für Störungen in Waldökosystemen
Box 5.2: Examples of disturbances in forest ecosystems



Box 5.2 Abbildung 1 Der dargestellte Hang zeigt starke Bodenerosion nach großflächigen Kalamitäten durch Windwurf 2002, nachfolgende Borkenkäferkalamität im „Jahrhundertsommer 2003" und den Forststraßenbau in Donnersbachwald. Foto: K. Katzensteiner

Box 5.2 Figure 1 Soil erosion after coarse scale forest disturbance by windthrow in 2002, subsequent bark beetle infestation in the extremely warm summer 2003 and road construction in a valley of the Austrian Alps. Photograph by K. Katzensteiner



Box 5.2 Abbildung 2 Die Graphik zeigt die Feststoff- und Porenverteilung eines in den 1950er Jahren aufgeforsteten Weidebodens an der Waldgrenze in den Tuxer Alpen (organische Auflage 1,5 cm). Auch Jahrzehnte nach der Aufforstung sind die Auswirkungen der früheren mechanischen Belastung als Reduktion des rasch leitenden Porenanteiles in 5–10 cm Tiefe noch deutlich erkennbar, was eine deutlich verringerte Infiltrationsfähigkeit zur Folge hat. Quelle: Markart und Kohl (2009)

Box 5.2 Figure 2 Organic matter, mineral grain size and pore size distribution in a forest soil at the timberline in the Tuxer Alps. The forest has been established on former pastureland in the 1950s. The litter layer is only 1.5 cm thick. The former soil compaction due to cattle grazing is still visible. The reduced amount of macro-pores in 5–10 cm depth inhibits water infiltration. Source: Markart und Kohl (2009)

Die angeführten Beispiele zeigen, dass der Einfluss des Klimawandels auf die Waldböden im Kontext des gesamten, auch durch die Nutzung geprägten Systems Wald gesehen werden muss. Die damit angedeuteten Zusammenhänge entscheiden über die Resilienz des Waldbodens gegenüber dem Klimawandel, auch wenn zu den Details noch keine ausreichenden Daten vorliegen.

sind sie aufgrund reduzierter chemischer Verwitterung und biologischer Aktivität von ihrer Struktur her weniger stabil und daher – zusätzlich zur Steilheit des Reliefs – anfällig für Erosion (Geitner, 2007). Dem Relief und der Geomorphodynamik kommt im Gebirge auf allen Maßstabsebenen eine dominante Rolle zu, zumal auch andere bodenbildende Faktoren stark durch topographische Effekte modifiziert werden, was besonders für das Mikroklima und den Wasserhaushalt entscheidend ist (Geitner et al., 2011). Die Höhenstufung von Klima und Vegetation führt zu starken Veränderungen der Böden in vertikaler Richtung, aber auch die Exposition hat einen wesentlichen Einfluss auf die Böden und ihre räumliche Verbreitung (Egli et al., 2006, 2009). Aufgrund dieser kleinräumig wechselnden Standortbedingungen sind die Abschätzungen möglicher Reaktionen der Böden auf den Klimawandel im Gebirgsraum unsicher. Dabei werden auch mögliche Veränderungen der Schneedecke eine wichtige Rolle spielen (vgl. Band 2, Kapitel 2). Zudem ist die Datenlage hinsichtlich der Böden in den Hochlagen sehr schlecht, da es kaum systematische Kartierungen oberhalb der Waldgrenze gibt. Über die Besonderheiten der Böden im Bereich der Waldgrenze gibt Stöhr (2007) einen Überblick.

Das aktuelle Höherwandern der Waldgrenze ist ein augenfälliges Phänomen (vgl. Abbildung 5.3), das vielfach mit dem Klimawandel in Zusammenhang gebracht wird, da die Wald- bzw. Baumgrenze in den Alpen von Klimafaktoren bestimmt wird (Körner, 1998). Zahlreiche Untersuchungen aus den Alpen und anderen Gebirgsregionen belegen diese Entwicklung (vgl. Band 2, Kapitel 3; Van der Meer et al., 2004). Speziell in den Alpen ist zu beachten, dass auch der Rückgang der landwirtschaftlichen Nutzung in der Waldgrenzregion zu einer Wiederbewaldung führen kann, was den Einfluss des Klimawandels derzeit noch deutlich überlagert (Gehrig-Fasel et al., 2007). Rückläufige Beweidung und fehlende Almpflege durch regelmäßiges Entfernen der Baumverjüngung führen in weiten Teilen der Alpen zu zunehmender Bewaldung in der subalpinen Stufe. Nach den Daten der österreichischen Waldinventur (BFW, 2011) hat die Waldfläche des subalpinen Fichtenwaldes und des Lärchen-Zirbenwaldes in Österreich zwischen den Inventurperioden 1992 bis 1997 und 2007 bis 2009 um ca. 15 000 ha zugenommen (vgl. Band 2, Kapitel 3).

Mit dem Ansteigen der Waldgrenze sind auch Bodenveränderungen zu erwarten. Nach Untersuchungen aus den Schweizer Alpen erhöht sich der Kohlenstoffvorrat in Waldböden um 4,5 t/ha C pro 100 Höhenmeter, was etwa einer Zunahme von 30 % über 1 000 Höhenmetern entspricht (Hagedorn et al., 2010a). Falls alpine Graslandökosysteme von Wäldern besiedelt werden, steigt der Kohlenstoffvorrat im Boden an (vgl. Abschnitt 5.4.3). Auf der anderen Seite ist aufgrund der erhöhten mikrobiellen Aktivität in Folge der Erwärmung in den tiefergelegenen subalpinen Waldökosystemen mit einer Freisetzung von Kohlenstoff vor allem aus den Auflagehumushorizonten zu rechnen (Hagedorn et al., 2010c).

Die Auswirkungen der sich überlagernden Entwicklungen (Nutzungswandel und Klimawandel) auf Böden der subalpinen Stufe sind wesentlich weniger gut dokumentiert. Untersuchungen von Tasser et al. (2001) zeigen, dass bei der Wiederbewaldung von Almweiden und Bergmähdern eine Anreicherung von organischer Substanz im Boden und der oberirdischen Biomasse innerhalb von 30 bis 50 Jahren



Abbildung 5.3 Natürliche Waldverjüngung durch Zirbe (*Pinus cembra*) und Lärche (*Larix decidua*) im Bereich der subalpinen Waldgrenze auf ehemaligen Weideflächen in der Gemeinde Sölden (Ötztal) auf ca. 2 200 m ü. d. M. im Jahr 2005. Foto: D. Stöhr

Figure 5.3 Natural forest regeneration with Arolla pine (*Pinus cembra*) and European larch (*Larix decidua*) in the range of the subalpine forest line on former grazing land in the municipality of Sölden (Ötz valley) at around 2 200 m a. s. l. in 2005. Photograph by D. Stöhr

nach der Aufgabe der landwirtschaftlichen Nutzung erfolgt. In der Übergangsphase von der landwirtschaftlichen Nutzung kann es zu einer Häufung von Naturgefahrenprozessen wie Erosion und Schneegleiten kommen, bevor sich die Ökosysteme mit Etablierung der Waldvegetation wieder stabilisieren (Tasser et al., 2001). Künstliche Aufforstung kann diesen Übergangszeitraum deutlich verkürzen.

Während eine Reihe von Studien die Auswirkungen von (erhöhten) Temperaturen auf die Vegetation und/oder die Funktionalität des Bodens in mittleren Höhenlagen untersucht (z. B. Diaz et al., 2003), ist die Höhenstufe oberhalb der Waldgrenze im Hinblick auf den Klimawandel deutlich schlechter erforscht. Das ist umso erstaunlicher, als diese Höhenlagen nicht nur in manchen Regionen (etwa in Tirol) einen beträchtlichen Anteil der Gesamtfläche ausmachen, sondern auch dadurch bedeutsam sind, dass diese Systeme in einigen Aspekten mit subpolaren und polaren Regionen verglichen werden können, wodurch die globale Bedeutung dieser Lagen offensichtlich ist. Hinzu kommt noch der Aspekt der Bodenstabilität, dem in den erosionsgefährdeten hochalpinen Regionen eine besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden muss.

Einflüsse des Klimawandels auf die abiotische Komponente des Bodens, z. B. auf die Textur, auf die Umwandlung primärer in sekundäre Minerale, die Kationenaustauschkapazität oder die Nährstoffgehalte sind kaum bekannt, sodass hier dringender Forschungsbedarf besteht. Lediglich eine Beeinflussung von Qualität und Quantität der organischen Substanz durch die Klimaveränderung und mögliche Rückkopplungsmechanismen wurde bereits mehrfach nachgewiesen (Hagedorn et al., 2010c; Schmidt et al., 2011), jedoch noch nicht in hochalpinen Böden.

In Bezug auf die Pflanzenwelt der Hochgebirge gibt es mit dem GLORIA-Projekt eine von Österreich ausgehende, international höchst angesehene Initiative zur Untersuchung alpiner/nivaler Ökosysteme und deren Beeinflussung durch den Klimawandel (vgl. Band 2, Kapitel 3). Diese Untersuchungen konnten deutliche Verschiebungen der Artenspektren und Aufwärtsbewegungen von Pflanzen als Reaktion auf steigende Temperaturen nachweisen (Gottfried et al., 2012); sie zeigen aber auch, dass entsprechende Effekte zum Teil von anderen Faktoren wie z. B. der Wasserverfügbarkeit überlagert bzw. verstärkt werden (Pauli et al., 2012).

Umfassende, die Bodenmikroflora einschließende Untersuchungen fanden dabei bisher kaum statt. Huber et al. (2007) untersuchten am Schrankogel (3 497 m Seehöhe), einer Mastersite des GLORIA-Projekts, Aspekte des Stickstoffkreislaufes im alpin-nivalen Ökoton. Sie fanden zwischen etwa 2 900 und 3 100 m Seehöhe die stärksten Unterschiede, sodass sie diesen Höhenbereich als sehr klimasensitiv einstuften. Weitere Untersuchungen u. a. zur Aktivität und Abundanz von Bodenmikroorganismen an diesem Modell-Standort finden seit 2011 statt (Thaler et al., 2013).

Wenn auch nicht in der nivalen, so doch in der hochalpinen Stufe wurden in den vergangenen Jahren z. B. im Gletschervorfeld des Rotmoosferners viele aufschlussreiche Untersuchungen durchgeführt, die sich mit der mikrobiellen Sukzession und Artenzusammensetzungen beschäftigten (Philippot et al., 2011; Tscherko et al., 2004). In jüngsten Untersuchungen konnte auch nachgewiesen werden, dass Archaea als die einzigen Organismen, die Methan bilden können, entgegen früheren Annahmen auch in diesen gut durchlüfteten hochalpinen Rohböden sehr abundant sind, wobei die Aktivität wiederum mit steigender Temperatur zunimmt (Hofmann et al., 2013). Auch hier gilt allerdings, dass Interaktionen mit dem Wassergehalt die entsprechenden Aktivitäten, in diesem Fall die Methanogenese, maßgeblich beeinflussen und den rein temperaturbedingten Effekt häufig übersteigen (Hofmann et al., 2013). An anderen Standorten konnte zudem gezeigt werden, dass das Ausmaß mikrobiell gebildeten und klimarelevanten Methans durch die Bewirtschaftungsformen und die Intensität der Viehhaltung sehr deutlich beeinflusst wird (Wagner et al., 2012). Diesem Effekt, der für Steppen bereits von Chen et al. (2011) nachgewiesen wurde, kommt vor dem Hintergrund unterschiedlicher Formen der Landnutzung und Viehhaltung eine bedeutende, auch globale Bedeutung zu.

Die Höhenlage und die damit verbundenen Temperaturbedingungen beeinflussen die Aktivität von Bodenmikroorganismen auch auf biochemischem Niveau. So konnten Margesin et al. (2009) zeigen, dass mit zunehmender Höhe die Temperatursensitivität der Bodenenzyme zunimmt, was eine klimatisch bedingte Beeinflussung der Umsatzraten in verschiedenen Stoffkreisläufen möglich erscheinen lässt. Auch für Bodentiere zeichnen sich Zusammenhänge mit der Temperatur, aber auch Interaktionen mit dem Bodenwasser ab, doch besteht diesbezüglich noch ein erheblich größerer Forschungsbedarf. Es wird zwar sowohl von österreichischen als auch von internationalen Forschungsgruppen intensiv die Bodenfauna im österreichischen Hochgebirge untersucht – z. B. an der Alpinen Forschungsstelle der Universität Innsbruck in Obergurgl –, doch sind hier die Forschungsarbeiten erst am Anfang und bislang noch nicht so sehr auf die Wirkungen des Klimawandels ausgerichtet (König et al., 2011).

Durch das verstärkte Auftauen von Permafrostböden (vgl. Band 2, Kapitel 4) in der alpinen und nivalen Stufe (in der Regel erst oberhalb von 2 500 m Seehöhe) könnte die im Permafrost konservierte organische Substanz von Bodenmikro-

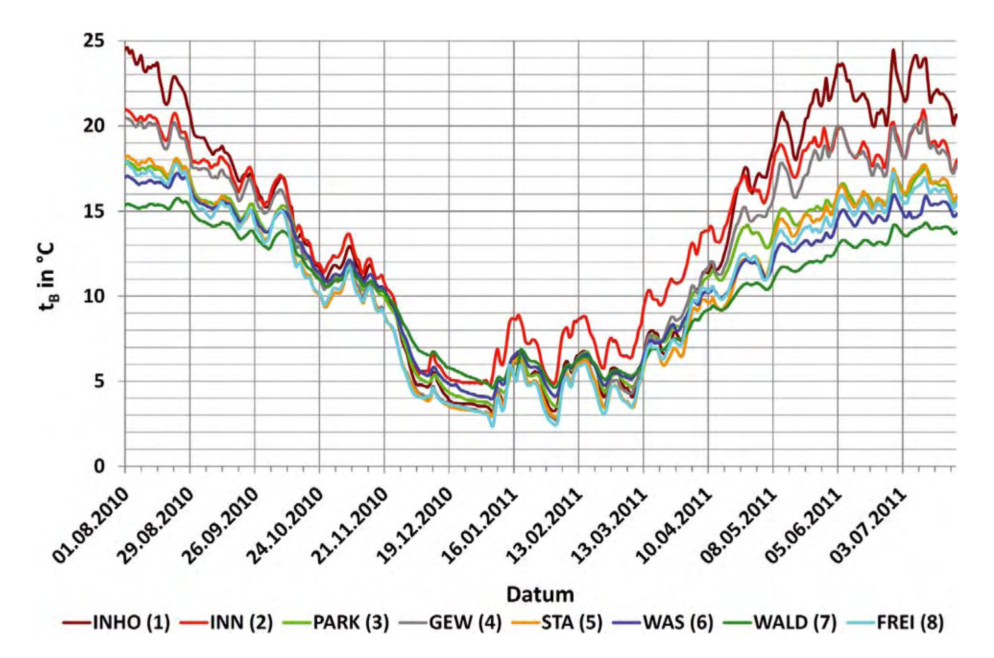


Abbildung 5.4 Tagesmittelwerte der Bodenprofiltemperaturen (tiefengewichtet) an allen Untersuchungsstandorten in Oberhausen (01.08.2010–31.07.2011). Quelle: Kuttler et al. (2012)

Figure 5.4 Daily averages of soil profile temperatures (depth-weighted) of all study sites in Oberhausen (01.08.2010–31.07.2011). Source: Kuttler et al. (2012)

organismen abgebaut werden, was zu einer zusätzlichen Freisetzung von Methan und CO_2 führen würde. Eine aktuelle Studie von Zollinger et al. (2013) aus der Schweiz konnte diese Annahme jedoch nicht bestätigen. Bei dem Vergleich von Böden ohne und mit Permafrosteinfluss zeigten sich in letzteren geringere Mengen an organischer Substanz, was eher darauf hinweist, dass diese auch bei Abbau des Permafrosts erhalten bleiben könnte.

5.4.5 Stadtböden

In städtischen Verdichtungsräumen wurden wesentliche Faktoren der Bodenentwicklung, wie etwa Relief, Ausgangsgestein, Klima sowie Fauna und Flora, intensiv seitens des Menschen verändert. Daraus folgt, dass sich viele Eigenschaften dieser Böden erheblich von denen im Umland unterscheiden und sich auf deren Funktionen als Pflanzenstandort, Lebensraum für Organismen, Schadstofffilter und Regulator des Landschaftswasserhaushalts auswirken (Blume et al., 2010a). Böden in Städten sind häufig überbaut bzw. versiegelt. Für diese Böden haben Klimaänderungen keine unmittelbaren Auswirkungen, da sie hinsichtlich Gas- und Wasseraustausch abgeschirmt sind. Auch offene Böden sind in ihrer Entwicklung oft wesentlich durch menschliche Eingriffe verändert bzw. durch Überlagerung mit natürlichen oder technogenen Substraten und deren Mischungen beeinflusst. So finden sich oft begrabene humose Horizonte in tieferen Schichten, während mineralisch geprägte Horizonte häufig in den oberen Profilbereichen vorkommen. Vielfach sind auch Artefakte wie Ziegelsteine, Beton und sonstiges Abbruchmaterial sowie verunreinigtes organisches Material in den Stadtböden zu finden. Ein natürlicher Aufbau des Bodens mit typischer Horizontfolge ist nur selten gegeben (Pietsch und Kamieth, 1991).

Das Stadtklima weist einige Besonderheiten auf. Im Jahresmittel ist es um 1–3 °C wärmer als im Umland (Blume et al., 2010a; Kuttler et al., 2012), wobei lokal und saisonal auch größere Unterschiede auftreten können. Dies spiegelt sich auch im Boden wider; innerstädtische, stark versiegelte Böden sind im Jahresmittel um ca. 3 °C wärmer als Böden am Stadtrand bzw. im Umland (vgl. Abbildung 5.4). Dies ist unter anderem auf den hohen Versiegelungsgrad, die verwendeten Baumaterialien und die ungünstigere Wasserversorgung der Standorte zurückzuführen (Kuttler et al., 2012).

Hinsichtlich der Feuchtigkeit ist zu beachten, dass bei hoher Staubbelastung der Luft aufgrund der erhöhten Anzahl an Kondensationskernen der Niederschlag vergleichsweise erhöht ist. Trotzdem sind die Böden in Städten grundsätzlich trockener, weil aufgrund der geringen Infiltrationsmöglichkeit mehr Wasser abfließt oder verdunstet (Kuttler et al., 2012). Die angeführten Beispiele belegen, wie Stadtökosysteme zur Verstärkung von Klimaextremen beitragen können. Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Stadtböden sind aufgrund ihrer Heterogenität im Aufbau und der kleinräumigen Muster kaum generalisierbar. Die Erhaltung bestimmter Bodenfunktionen, vor allem im Wasserhaushalt, ist daher von besonderer Bedeutung. Konkretere Beurteilungen erfordern Expositionsversuche unter verschiedenen Bedingungen.

Durch hohe Anteile versiegelter und verdichteter Böden wird es bei Starkregen zu erhöhtem Oberflächenabfluss

kommen. Bei Anwesenheit von porösen Materialien wie Ziegel, Tuff oder Aschen ist zumindest lokal von einer erhöhten Wasserspeicherfähigkeit auszugehen. Bei einer Erhöhung der Temperaturen und ausreichender Feuchtigkeit kann es in humusreichen Böden, wie sie beispielsweise in Haus- oder Schrebergärten vorliegen, zu einem verstärkten Abbau der organischen Substanz kommen. Erhöhen sich die Windgeschwindigkeiten, so ist bei offenen, unbewachsenen Böden vermehrter Bodenabtrag zu erwarten, besonders dann, wenn die Böden trocken und von geringer Bindigkeit sind (Blume et al., 2010a).

5.5 Anthropogene Beeinträchtigungen von Böden in Bezug auf den Klimawandel
5.5 Anthropogenic disturbances of soils with respect to climate change

Auch für die Böden stellt das „Anthropozän“ (vgl. Band 1; Crutzen und Stoermer, 2000) eine Phase tiefgreifender Veränderungen und Belastungen dar. Auch wenn der Einfluss des Menschen durch Land- und Forstwirtschaft, insbesondere durch die Kultivierung von Böden nach Rodung der natürlichen Waldbestände, seit Jahrtausenden gegeben ist (McNeill und Winiwarter, 2004, 2010), sind die Gefährdungen des Bodens seit der Industrialisierung vielfältiger und intensiver geworden, sodass seine ökologischen Leistungen deutlich eingeschränkt worden sind (Blume et al., 2010a). Gegen Ende des 20. Jahrhunderts wurde auch politisch Verantwortlichen klar, dass neben dem Schutz anderer Umweltgüter wie Wasser oder Luft auch dem Boden mehr Aufmerksamkeit zuteil werden muss.

Daher wurde auf Europäischer Ebene im Rahmen des 6. Umweltaktionsprogramms 2002 eine thematische Strategie (KOM(2002)179 endgültig, Kommission der Europäischen Gemeinschaften, 2002) entwickelt, zu der die damals 15 Umweltministerinnen und -minister Ratsschlussfolgerungen annahmen. In der entsprechenden Mitteilung der Kommission „Hin zu einer spezifischen Bodenschutzstrategie“ wurden acht Hauptgefahren für die Böden in der EU benannt: Erosion, Rückgang der organischen Substanz, Kontamination, Versiegelung, Verdichtung, Rückgang der biologischen Vielfalt im Boden, Versalzung sowie Überschwemmungen und Erdrutsche (Kommission der Europäischen Gemeinschaften, 2002).

Ein großer Teil der thematischen Strategie Bodenschutz wurde bzw. wird umgesetzt. Der Vorschlag der Europäischen Kommission aus dem Jahr 2006 für eine Bodenschutz-Rahmenrichtlinie konnte jedoch im Rat wiederholt keine ausreichende Mehrheit finden. Der Entwurf von 2006 wird von mehreren Staaten, darunter auch Österreich, nicht als das angemessene, zukunftsweisende Instrument gesehen. Im 7. Umweltaktionsprogramm und auf internationaler Ebene wird der Bodenschutz weiter verfolgt.

In Bezug auf den Klimawandel kommt den anthropogenen Beeinträchtigungen des Bodens eine zusätzliche Bedeutung zu. Die damit verbundenen physikalischen, chemischen und biologischen Veränderungen können die Resilienz des Bodens gegenüber dem Klimawandel maßgeblich vermindern. Der an das Klima gekoppelte Wasserhaushalt steht in engem Bezug zu physikalischen, teilweise aber auch chemischen Veränderungen des Bodens, was nachfolgend an den Gefährdungen durch Erosion und Verdichtung aufgezeigt werden soll.

5.5.1 Bodenerosion

Etwa 12 % der Gesamtfläche Europas sind durch Wasser- und Winderosion gefährdet (CEC, 2006). Schätzungen deuten darauf hin, dass als Folge des Klimawandels das Erosionsrisiko bis zum Jahr 2050 auf 80 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche Europas ansteigen wird (EEA, 2000). Davon werden jene Regionen – darunter auch Österreich – besonders betroffen sein, in welchen die Bodenerosion aktuell bereits hoch ist (EEA, 1999).

Österreichweit liegen bisher nur wenige Studien zu den Folgen des Klimawandels für den Bodenverlust durch Erosion auf landwirtschaftlich genutzten Flächen vor (Scholz et al., 2008; Klik und Eitzinger, 2010). Landwirtschaftlich genutzte Gebiete werden insgesamt vorrangig untersucht, weil das Ausmaß des Bodenabtrags dort bereits ein Problem darstellt. In den zur Verfügung stehenden Studien wurden für verschiedene Feldfrüchte und Gebiete einerseits die durch den Klimawandel zu erwartenden Effekte auf den Bodenabtrag berechnet, andererseits auch die Wirkung von Erosionsschutzmaßnahmen unter den Bedingungen des Klimawandels abgeschätzt. Dabei zeigte sich, dass im Allgemeinen die positive Wirkung von Erosionsschutzmaßnahmen (falls angewendet) weitaus stärker war, als die durch den Klimawandel erwarteten negativen Effekte. Während Scholz et al. (2008) allgemein geringere Erosionsraten für die Kombination aus verwendetem Klimaszenario und geänderten Inputparametern berechneten, wurden bei Klik und Eitzinger (2010), in Abhängigkeit von den verwendeten Klimaszenarien, sowohl höhere als auch niedrigere Erosionsraten berechnet. Die Ergebnisse beider Untersuchungen sind mit hohen Unsicherheiten behaftet. In Abbildung 5.5 sind die

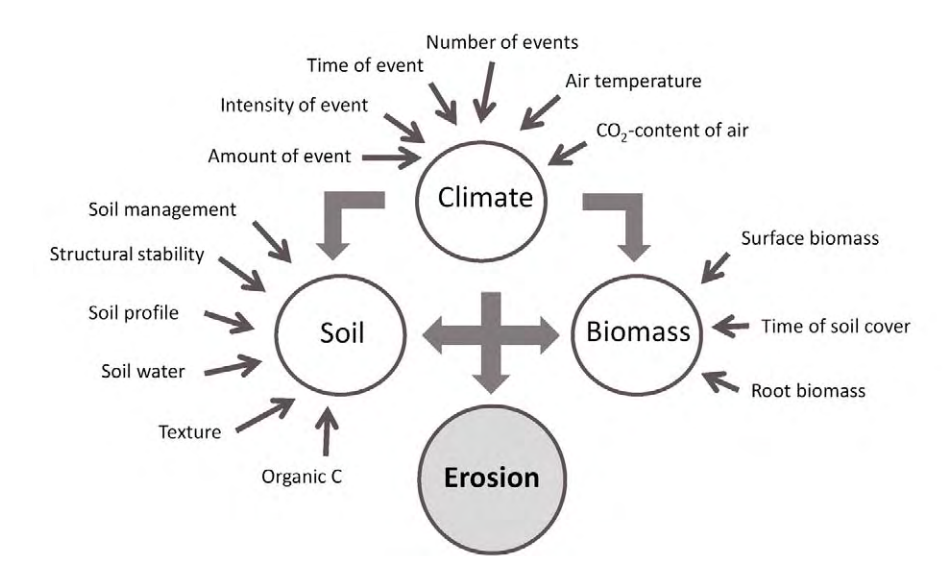


Abbildung 5.5 Generalisierte Wechselwirkungen zwischen klimarelevanten Bestimmungsfaktoren der Bodenerosion (Wind und Wasser). Erstellt von Strauss für AAR14

Figure 5.5 Generalized interactions between factors affected by climate and affecting erosion processes (wind and water). Developed by Strauss for AAR14

Wechselwirkungen zwischen den relevanten Einflussfaktoren für die Bodenerosion generalisiert dargestellt.

Aus Abbildung 5.5 wird ersichtlich, dass eine Vielzahl klimatischer Kenngrößen wie Häufigkeit und Intensität eines auftretenden Ereignisses sowie Lufttemperatur etc. die Bodenerosion direkt beeinflusst. Zusätzlich spielen diese Faktoren aber indirekt über ihren Einfluss auf den Boden und in Bezug auf die Biomasse eine wichtige Rolle. Dies gilt sowohl für Wind- als auch Wassererosion. Für eine Prognose des Ausmaßes der Bodenerosion unter den Bedingungen des Klimawandels ergibt sich eine Reihe von Schwierigkeiten: Einerseits ist aufgrund der komplexen Wechselwirkungen zwischen geänderten Umweltbedingungen und der Anpassung der landwirtschaftlichen Produktion eine Abschätzung von durch die Bedingungen des Klimawandels geänderten Parameterwerten für Erosionsmodelle schwierig. Andererseits sind die aktuell verfügbaren Informationen zur Änderung wichtiger klimatologischer Basisdaten unter den Bedingungen des Klimawandels nicht ausreichend.

So herrscht zwar derzeit Übereinstimmung darüber, dass allgemein mit einer Abnahme von Niederschlagsereignissen bei gleichzeitiger Erhöhung der Niederschlagintensität zu rechnen sein wird (IPCC, 2007), eine für die Modellierung von Bodenerosion notwendige Quantifizierung ist bisher aber nur für Einzelauswertungen möglich, da die vorhandenen globalen Klimamodelle noch nicht in der Lage sind, etwa die erwarteten Intensitäten von Ereignisniederschlägen zu prognostizieren.

Im Folgenden werden einige internationale Studien angeführt. Basierend auf den Ergebnissen von zwei mit globalen Zirkulationsmodellen (global circulation models – GCM) erstellten Klimaszenarien berechnete Nearing (2001) mithilfe verschiedener Modelle mögliche Veränderungen der Regenerosivität für die USA (vgl. Band 3, Kapitel 2). Trotz unterschiedlicher Modellresultate ergaben sich für die gesamten USA bis zum Jahr 2100 signifikante Veränderungen von im Mittel 16 %, was beträchtliche Auswirkungen auf zukünftige Erosionsraten haben kann. Zhang et al. (2005) evaluierten mögliche Effekte der Klimaänderung auf die Erosivität im Einzugsgebiet des Gelben Flusses bis zum Jahr 2100. Die Berechnungen ergaben eine signifikante Zunahme der Regenerosivität in den kommenden Jahrzehnten. Außerdem waren die prozentuellen Veränderungen in der Erosivität um den Faktor 1,2–1,4 größer als jene des Niederschlages.

Laut Sauerborn et al. (1999) ist auch für Teile von Deutschland eine Zunahme der Regenerosivität zu erwarten. Verstraeten et al. (2006) analysierten eine 100-jährige Niederschlagsmessreihe für eine Station in Belgien und fanden keinen signifikanten Trend in der Erosivität. Dennoch lag der Mittelwert für den Zeitraum 1991 bis 2002 um 31 % über jenem des Zeitraums 1898 bis 1990. Studien in Italien zeigten einen negativen Trend im Jahresniederschlag, einen schwachen Trend für eine Intensitätszunahme, jedoch keinen Trend hinsichtlich einer Änderung der Regenerosivität (Brunetti et al., 2001; Buffoni et al., 1999; D'Asaro et al., 2007). Für die iberische Halbinsel ergaben Untersuchungen von De Luis et al. (2010) eine Abnahme der Erosivität unter semiariden Bedingungen, jedoch eine Zunahme in ariden und humiden Gebieten.

Pruski und Nearing (2002) simulierten für acht Standorte in den USA die Bodenerosion mit Daten aus GCM-Klimaszenarien für den Zeitraum bis 2100. Vielfältige Interaktionen zwischen den einzelnen erosionsauslösenden Faktoren zeigten einen großen Einfluss auf Oberflächenabfluss und Bodenabtrag. Direkte Auswirkungen von Zu- bzw. Abnahmen im Niederschlag auf Abfluss und Erosion waren zwar zu beobachten,

oft aber nicht dominant. Vielmehr hing die Abtragsrate von der dadurch hervorgerufenen Veränderung in der Biomasse ab. Dennoch berechneten die Autoren für Gebiete mit einer Niederschlagszunahme eine Veränderung des Abflusses zwischen −13 % und +41 % und eine Zunahme der Erosion von 15 bis 102 %. Berechnungen von Michael et al. (2005) für zwei Standorte in Sachsen ergeben eine Zunahme des Bodenabtrags im Zeitraum bis 2050, wobei mögliche Veränderungen von Bodenkennwerten sowie in der Bewirtschaftung nicht berücksichtigt wurden.

Rippel und Stumpf (2008) verglichen zwei Klimamodelle (ECHAM5 und ECHAM4) im Hinblick auf ihre Auswirkungen auf die Bodenerosion in Bayern. Bis 2050 ergaben sich mit ECHAM5 im Durchschnitt nur geringe Veränderungen beim Bodenabtrag (Abnahme um 1 %). Auf Grundlage von ECHAM4 berechneten sie für den gleichen Zeitraum einen Anstieg des Bodenabtrags auf durchschnittlich 116 % (d. h. eine Zunahme von 16 %) bei einer Spannweite von 98 bis 157 %.

Berechnungen mit Klimamodellen ergeben für das Alpenvorland zumeist geringere Niederschläge im Sommerhalbjahr (vgl. Band 1, Kapitel 4). Dies gilt vor allem für den Zeitraum von April bis Juni, jenen Zeitraum also, in welchem aufgrund der geringen Bodenbedeckung bei Frühjahrskulturen die größte Erosionsgefährdung besteht. Mithilfe eines Erosionsmodells zeigten Scholz et al. (2008) auf, dass derart veränderte Klimabedingungen zu einer Reduktion des Bodenabtrags bei Zuckerrüben führen werden. Geringere Niederschläge werden auch geringere Oberflächenabflüsse zur Folge haben, allerdings besteht hier eine Unsicherheit bei der Veränderung von Starkniederschlägen, die regional zunehmen und damit die Erosionsgefahr wieder ansteigen lassen könnten (vgl. Band 1, Kapitel 4). Eine Simulationsstudie für Mistelbach in Niederösterreich ergab, dass sich der Abfluss, je nach verwendetem Klimamodell, zwischen 8 und 60 % verringert (Klik und Eitzinger, 2010). Der Bodenabtrag kann hingegen je nach Modell und Emissionsszenario um bis zu 55 % sinken oder um bis zu 56 % ansteigen. Maßnahmen zur Verringerung der Bodenerosion im Bereich der Landwirtschaft sind im Band 3, Kapitel 2 angeführt.

Nicht explizit in Abbildung 5.5 angeführt sind die Änderungen der Faktoren Boden und Biomasse durch geänderte menschliche Aktivitäten wie den Anbau neuer Sorten oder neuer Arten von Feldfrüchten, aber auch durch mögliche Änderungen im Anbauzeitpunkt, die mit einem früheren Beginn der Vegetationsperiode zu erwarten sind.

Aktuell tritt Winderosion räumlich sehr begrenzt in einigen Gebieten Ostösterreichs auf (Strauss und Klaghofer, 2006). Begünstigt wird diese einerseits durch die höheren mittleren Windgeschwindigkeiten, andererseits durch das Vorkommen von sandreichen Böden sowie Böden mit einem hohen Anteil an organischer Substanz (Schwarzerden). Organisches Material ist in trockenem Zustand sehr leicht und kann deswegen auch leicht durch Wind transportiert werden. Durch höhere Jahresdurchschnittstemperaturen werden die Wassergehalte der Böden geringer. Im Zusammenwirken mit den geringen Speicherfähigkeiten sandiger Böden sollte dies als logische Konsequenz zu höheren Winderosionsraten führen. Die Wechselwirkung zwischen tatsächlichen Effekten und geänderten Klimabedingungen wurden für das Phänomen Winderosion bisher in Österreich nicht untersucht (vgl. Band 2, Kapitel 4).

In gebirgigen Regionen spielt auch die Erosion durch flachgründige Lockermaterialrutschungen und Schneeschurf flächenmäßig eine gewisse Rolle (vgl. Band 2, Kapitel 4; Tasser et al., 2004; Wiegand und Geitner, 2012, 2013). Für diese Formen des flachgründigen Abtrags, vor allem auf Wiesenflächen, wird in vielen Fällen die Aufgabe der Nutzung verantwortlich gemacht, wobei auch der Klimawandel durch aktuelle Studien in der Schweiz (Meusburger und Alewell, 2008) als Verursacher diskutiert wird. Um die komplexen Prozesse dieser Abtragsformen noch besser zu verstehen und somit mehr Sicherheit für die Abschätzung zukünftiger Entwicklungen zu bekommen, braucht es weitere Detailstudien mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung und ein solides Monitoring ausgewählter Flächen (Wiegand et al., 2013; Flöck et al., 2013; EROSTAB, 2013a; EROSTAB, 2013b).

5.5.2 Bodenverdichtung

Durch die Nutzung von Böden kommt es häufig zu Bodenverdichtungen. In der Land- und Forstwirtschaft, aber auch im Zuge der Errichtung von Bauten (z. B. Pipelines, Stromleitungen) trägt der Einsatz schwerer Maschinen wesentlich zu dieser bei (Hamza und Anderson, 2005; Batey, 2009). Besonders in intensiven landwirtschaftlichen Systemen mit häufigem Maschineneinsatz und kurzem Fruchtwechsel kann dies zu teils irreversiblen Schäden an der Bodenstruktur, vor allem im Unterboden, führen (Murer et al., 2012). Im Grünland entstehen Bodenverdichtungen durch intensive Beweidung. Bodenverdichtung resultiert in Veränderungen des Bodengefüges mit einem Verlust an Porenraum. Hiervon sind insbesondere die Grobporen betroffen, die für Wasserinfiltration und Dränung, aber auch für den Gasaustausch verantwortlich sind. Bei einer Zunahme von Extremereignissen würde das Niederschlagswasser häufiger und vermehrt oberflächlich abfließen und somit das Hochwasser- und Erosionsrisiko erhöhen. Zugleich ist das Porensystem ein wichtiger Lebensraum für Bodenmi-

kroorganismen und Bodentiere, welche für die Umsetzung von organischer Substanz und damit für die Bereitstellung von Pflanzennährstoffen verantwortlich sind. Bodenverdichtung führt daher zu einem Verlust an Funktionalität von Nährstoffkreisläufen und in der Wasser- und Luftversorgung von Pflanzen und Bodenorganismen (Blume et al., 2010a; Brandstetter und Wenzel, 1997). Die Pflanzen reagieren auf den höheren Bodenwiderstand mit verstärkter Produktion von Mucigel (Schleimschicht auf der Wurzeloberfläche), um den Eindringwiderstand zu verringern (Somasundaram et al., 2009; Iijima et al., 2000). Dafür ist ein höherer Energieaufwand erforderlich, welcher letztendlich zu einer geringeren Effizienz der Biomasseproduktion führt.

Die Reduktion der Poren und der Porenkontinuität hat u.a. auch Auswirkungen auf das Redoxpotential, da es zu Sauerstoffmangel, insbesondere nach Niederschlagsereignissen, kommen kann. Dies führt zur Reduktion von Eisen und Mangan und kann zu toxischen Konzentrationen dieser und anderer redox-sensitiver Elemente führen. Bei Sauerstoffmangel ist auch die Umsetzung organischer Substanzen, z.B. von Ernterückständen, gehemmt, da es anstelle des oxidativen Abbaus zu Verwesungsprozessen mit teils pflanzentoxischen Wirkungen kommt (Blume et al., 2010a). Bei stark reduktiven Bedingungen kommt es zur Produktion und Ausgasung von Methan, einem Treibhausgas mit etwa 25-facher Wirkung im Vergleich zu CO_2.

Eine weitere Folge der mangelnden Belüftung durch Bodenverdichtung ist die mikrobielle Bildung von N_2O aus anderen Stickstoffverbindungen. Dies führt nicht nur zu Stickstoffverlusten, insbesondere aus Düngemitteln, sondern verstärkt wiederum den Treibhauseffekt, da N_2O ungefähr die 300-fache Wirkung von CO_2 entfaltet (Teepe et al., 2004).

Bodenverdichtung führt somit zu einer Zunahme der Erosion und Verlusten an Bodenfruchtbarkeit. Eine verringerte Effizienz landwirtschaftlicher Produktion kann zu einer Ausweitung landwirtschaftlicher Flächen und/oder zu einem höheren Ressourceneinsatz führen. Generell wird mit der Verdichtung die Vulnerabilität der Böden gegenüber dem Klimawandel deutlich erhöht, und sie führt zu einer verstärkten Produktion von Treibhausgasen.

5.6 Auswirkungen des Klimawandels auf die Ökosystemleistungen der Pedosphäre

5.6 Consequences of climate change for ecosystem services of the pedosphere

Das Konzept der Ökosystemleistungen (vgl. Band 2, Kapitel 1) schließt den Boden als wesentlichen Bestandteil von Ökosystemen mit ein. Da die entsprechenden Leistungen aber in der Regel vom gesamten Ökosystem erbracht werden, stellt die isolierte Betrachtung des Bodens eine fragwürdige Reduktion dar. Zudem sind die durch den Klimawandel bedingten Veränderungen im Boden so stark vom Bodentyp und seiner standörtlichen Einbindung abhängig, dass in Bezug auf die Ökosystemleistungen nur sehr allgemeine Aussagen möglich sind.

5.6.1 Unterstützende Ökosystemleistungen (Supporting Services)

Während die anderen drei Kategorien den Menschen direkt beeinflussen, werden unter den unterstützenden Dienstleistungen jene Prozesse zusammengefasst, welche die anderen Dienstleistungen aufrechterhalten. Solche Prozesse sind zum Beispiel Nährstoffkreislauf, Bodenbildung, Primärproduktion etc. Der Boden ist an diesen Prozessen maßgeblich beteiligt. Auswirkungen des Klimawandels auf diese Leistungen sind daher zu erwarten, müssen aber sowohl zeitlich und räumlich als auch hinsichtlich der beteiligten Teilprozesse stark differenziert werden, sodass keine allgemeinen Tendenzen angegeben werden können.

Die aktuelle Diskussion geht dahin, die Kategorie der unterstützenden Dienste nicht gesondert zu berücksichtigen, weil diese zum einen eher im Bereich der Ökosystemprozesse und weniger bei den Leistungen anzusiedeln sind, zum anderen käme es bei ihrer Bewertung leicht zu Doppelzählungen. Vor dem Hintergrund einer eindeutigen Messbarkeit hat sich nach Boyd und Banzhaf (2007) die Idee der finalen Ökosystemleistungen – FÖL entwickelt (vgl. Band 2, Kapitel 1), die beispielsweise auch in der Studie „Ökosystemleistungen und Landwirtschaft" (Götzl et al., 2011) Anwendung findet.

5.6.2 Bereitstellende Ökosystemleistungen (Provisioning Services)

Der Mensch nutzt eine Vielfalt von Kulturpflanzen für unterschiedliche Zwecke (Ernährung, Energie etc.), schafft In-

frastruktur für seine Lebensbedürfnisse wie etwa Siedlungen oder Verkehrswege und bezieht Rohstoffe aus dem Boden. Somit stellen die Böden Leistungen als Produktionsgrundlage, Standort und als Quelle von Ressourcen für den Menschen zur Verfügung.

Neben der direkten Einflussnahme des menschlichen Handelns (Flächenverbrauch durch Bebauung, Veränderung des Wasserhaushaltes durch Drainagierung etc.) werden die Dienstleistungen des Bodens auch durch die Veränderung des Klimas beeinflusst. Dies betrifft in Hinblick auf die bereitstellenden Dienstleistungen vor allem seine natürliche Ertragsfähigkeit. Steigende Temperaturen führen zu einem Anstieg der potentiellen Verdunstung. Verringern sich gleichzeitig die Niederschlagsmengen, kann dadurch die Ertragsfähigkeit der Böden negativ beeinflusst werden. Eine erhöhte CO_2-Konzentration in der Atmosphäre wirkt auf das Pflanzenwachstum (Steigerung der Photosyntheseleistung), wodurch sich die Wasser- und Nährstoffansprüche gegenüber dem Boden verschieben können. Erhöhte Temperaturen beeinflussen darüber hinaus den Auf- und Abbau der organischen Substanz, die für den Erhalt der Bodenfruchtbarkeit unerlässlich ist.

5.6.3 Selbstregulierende Ökosystemleistungen (Regulating Services)

Böden stellen Regelungsmechanismen zur Verfügung, die mit dazu beitragen, dass die Menschen in einer stabilen, gesunden und resilienten Umwelt leben können. So hat der Boden das Vermögen, Wasser zwischenzuspeichern und dadurch das Risiko von Hochwasserereignissen zu reduzieren, Stoffe zu adsorbieren und das Grundwasser vor dem Eintrag schädlicher Substanzen zu schützen, organisches Material zu zersetzen und den Organismen als Nährstoffe wieder zur Verfügung zu stellen, durch biologische Prozesse gefährliche chemische Verbindungen in ungefährliche zu überführen und die Ausbreitung von schädlichen Krankheitsüberträgern zu kontrollieren. Außerdem stellt er einen wesentlichen Speicher für viele atmosphärische Bestandteile dar.

Während das Klima über Niederschlagsmenge und -intensität einen direkten Einfluss auf das Abflussgeschehen eines Standortes ausübt, bewirken klimabedingte Veränderungen des Wasser- oder Wärmehaushalts des Bodens eine Veränderung des Bodenlebens (Aktivität, Biomasse und Zusammensetzung) und dadurch der biologischen Prozesse. Bei anaeroben Verhältnissen infolge einer ständigen Wassersättigung des Bodens verringert sich die mikrobielle Aktivität, wodurch die Zersetzung sowie die Stofftransformation herabgesetzt werden. Eine Erhöhung der Bodentemperatur bewirkt eine Zunahme der biologischen Aktivität und damit eine erhöhte Umsetzung der organischen Substanz, was zu einem Verlust an organischem Kohlenstoff führt. Da der Humus im Boden an allen regulierenden Prozessen maßgeblich beteiligt ist, sind seine Veränderungen hinsichtlich der entsprechenden Dienstleistungen relevant.

5.6.4 Kulturelle Leistungen (Cultural Services)

Der Boden als Teil der Landschaft war und ist in vielen Kulturen Quelle ästhetischer und spiritueller Bereicherung. In modernen Gesellschaften existiert meist weder der unmittelbare Bezug zum Boden noch ein Bewusstsein über seine Bedeutung. Trotzdem spielen die kulturellen Dienstleistungen hinsichtlich der Erholung und der Attraktivität des Landschaftsbildes heute eine gewisse Rolle. Der Einfluss des Klimawandels auf diese Dienstleistungskategorie hat jedoch eine geringere Bedeutung, da eine beständige naturnahe Landschaft nicht einer sich verändernden naturnahen Landschaft überzuordnen ist. Ein ästhetischer Wert wird vielmehr durch bestimmte menschliche Überprägungen (z. B. durch Intensivlandwirtschaft, Versiegelung, Verbauung) vermindert.

Da Böden aufgrund ihrer komplexen Systemeigenschaften und ihrer ausgeprägten räumlich-zeitlichen Differenzierung für die Forschung weiterhin eine große Herausforderung darstellen werden, kann in diesem Zusammenhang ihr kultureller Beitrag im Sinne ökologischer und mensch-umwelt-bezogener Erkenntnis betont werden.

5.7 Forschungsbedarf
5.7 Research needs

Böden reagieren in vielfacher Weise auf Klimaänderungen, doch zahlreiche Fragen sind noch ungelöst. Diese betreffen einerseits Details im Prozessverständnis, andererseits die zeitliche und räumliche Differenzierung. In jedem Fall sollte die Forschung eine langfristige Erfassung der Bodenveränderungen forcieren, da derzeit nicht abzusehen ist, ob und bei welchen Prozessen im Boden selbstverstärkende Entwicklungen in Gang gesetzt werden oder ob und in welcher Zeit das System wieder einen gewissen Gleichgewichtszustand erreicht. Zur Klärung dieser Fragen sind Langzeitbeobachtungen in der Dimension von zehn Jahren und mehr unabdingbar. Daher müssen bestehende Langzeit-Monitoring Standorte sowie Dauerfeldversuche, die zur Klärung aktueller Fragestellungen herangezogen werden können, erhalten sowie Probenentnahmen und -analysen finanziert werden. Für die notwendigen,

teilweise auch stark interdisziplinär auszurichtenden Studien sollten folgende allgemeine Kernfragen leitend sein:

- Wo liegen die Grenzwerte klimatischer Veränderungen für die Reaktion bestimmter Bodenprozesse?
- Was bedeutet dies langfristig für die Merkmale, Eigenschaften und Funktionen von Böden?
- Bei welchen Prozessen werden selbstverstärkende Entwicklungen ausgelöst, und welche Prozesse pendeln sich auf einem neuen, weitgehend stabilen Gleichgewichtszustand wieder ein?
- Gibt es kritische Punkte, bei deren Erreichen das System in einen neuen Zustand zu kippen beginnt?
- Welche Prozesse in Böden wirken sich ihrerseits auf den Klimawandel aus?
- Welche räumliche, zeitliche und inhaltliche Differenzierung muss in den Klima- und Bodendaten gegeben sein, um verlässliche Aussagen treffen zu können?
- Ab welchem Ausmaß der Veränderungen sind die Ökosystemleistungen von Böden maßgeblich gefährdet?
- Mit welchen Maßnahmen kann man die Resilienz der Böden fördern, bzw. wodurch können die erwünschten Ökosystemleistungen trotz klimatisch bedingter Veränderungen auf etwa gleichem Niveau erhalten werden?

Neben diesen grundsätzlichen Fragen soll der Forschungsbedarf bezüglich folgender Zusammenhänge – in der Reihenfolge des vorliegenden Kapitels – hervorgehoben werden:

- Von einem veränderten Wasserhaushalt der Böden durch den Klimawandel werden einige Schlüsselprozesse betroffen sein, die im Detail zu untersuchen sind. Dazu gehören auch Untersuchungen zur Schadstoffmobilisierung im System Boden-Gewässer.
- Über die Veränderungen physikalischer und chemischer Prozesse im Boden durch den Klimawandel ist zu wenig bekannt, z. B. in Bezug auf die Textur, auf die Umwandlung primärer in sekundäre Minerale oder die Kationenaustauschkapazität.
- In Bezug auf die Bodenlebewelt ist die Erforschung der Wechselwirkungen von verschiedenen Klimaelementen (Temperatur, Niederschlag, erhöhte CO_2-Konzentration in der Atmosphäre etc.) in Freilandmanipulationsexperimenten notwendig. Dabei geht es einerseits um die Beeinträchtigung der Bodenbiodiversität und bestimmter Schlüsselorganismen, andererseits müssen mikrobielle Umsatzleistungen, die dem Erhalt der Bodenfunktionen dienen, analysiert werden.
- An der Schnittstelle physikalisch-chemischer und biologischer Prozesse sind komplexe Veränderungen durch den Klimawandel wahrscheinlich, so z. B. bei der Bildung und Stabilität von Aggregaten; diese Prozesse finden bisher zu wenig Beachtung.
- In Bezug auf den Kohlenstoffhaushalt sind für verlässlichere Abschätzungen der Auswirkung des Klimawandels folgende Themenkomplexe weiter zu untersuchen, wobei die Durchführung von Bodenanalysen und -experimenten bzw. die Weiterführung von Langzeitversuchen unerlässlich sind: Die Entwicklung der Bodenkohlenstoffvorräte in unterschiedlichen klimatischen Regionen und unter Berücksichtigung der Bewirtschaftungsweise und der Nutzungshistorie, die Analyse der Faktoren, die auf die Stabilität der Humuskomplexe unter unterschiedlichen Nutzungs-, Bewirtschaftungs- und Klimabedingungen den größten Einfluss haben, die Rolle des Unterbodens im Hinblick auf die Kohlenstoffspeicherung, die Erstellung von biogeochemischen Kohlenstoffbilanzen für gut untersuchte Standorte unter verschiedenen Formen der Landnutzung und deren Änderung. Auch die Auswirkungen intensivierter Nutzung von Waldböden auf deren Kohlenstoffhaushalt sind noch nicht ausreichend untersucht.
- In Bezug auf den Stickstoffhaushalt sowie die Dynamik weiterer Nährstoffe (z. B. Phosphor) stellt sich die Frage, ob eine Steigerung der Effizienz unter den Bedingungen des Klimawandels möglich ist. Eine solche Steigerung ist jedoch zur Erhaltung der Ernährungssicherheit bei gleichzeitig vermehrten Ansprüchen an Böden (Stichwort: Bioenergie) dringend notwendig.
- In Bezug auf Acker, Grünland und Wald stellt sich die Frage, wie Klimawandel und mögliche Landnutzungsänderungen zusammenwirken.
- In Bezug auf das Grünland sind der Vorrat an organischem Kohlenstoff im Unterboden und die Größe und Dynamik einzelner Kohlenstoffpools (insbesondere Wurzel- und Stoppelmasse) zu untersuchen, ebenso die Auswirkungen einer Intensivierung der Grünlandbewirtschaftung und einer Bewirtschaftungsaufgabe auf Größe und Dynamik einzelner Kohlenstoffpools. Dabei sind die jeweiligen Landschaftsräume, Höhenstufen, Boden- und Vegetationstypen zu differenzieren.
- Bei Waldökosystemen zeigen sich besondere Anfälligkeiten gegenüber Störungen, deren Ausmaß unter den Bedingungen des Klimawandels noch nicht abgeschätzt werden kann. Besonderer Forschungsbedarf besteht hinsichtlich Rückkopplungseffekten von klimabedingten

Einflüssen auf biogeochemische Prozesse und Kreisläufe im Waldökosystem. Die Interaktionen zwischen Dynamik / Änderung der Vegetationsdecke, deren Erholung nach Störungen und Bodenprozessen können nur in langfristig angelegten interdisziplinären Projekten untersucht werden. Auch wie eine steigende Waldgrenze sich auf die Böden auswirkt, ist noch nicht ausreichend bekannt.

- Bezüglich der Retentionskapazität der Wälder stellt sich die Frage nach relevanten Schwellenwerten, möglichen Kippeffekten und kritischen Systemzustände (z.B. hydrophobe Effekte nach Austrocknung, hohe Vorbefeuchtung) und wie sich die Reaktionsmuster von verschiedenen Bestandestypen bzw. in verschiedenen Regionen Österreichs ändern.
- Gebirgsböden, insbesondere oberhalb der Waldgrenze, sind bisher sehr wenig untersucht. Aufgrund der kleinräumigen Differenzierung sind umfangreiche Studien nötig, um mögliche Auswirkungen des Klimawandels abschätzen zu können. Im Übergangsbereich zwischen alpiner und nivaler Höhenstufe besteht ein noch größeres Wissensdefizit.
- In Bezug auf die möglichen Veränderungen von Stadtböden durch Klimaänderungen liegen in Österreich keine Untersuchungen vor. Mit Expositionsversuchen könnten entsprechende Ergebnisse hinsichtlich der Besonderheiten von Stadtböden (oft kein natürlicher Bodenaufbau, hohes Maß an Heterogenität) erzielt werden.
- Es sollte untersucht werden, wie weit die Resilienz von Böden gegenüber dem Klimawandel durch anthropogene Belastungen eingeschränkt wird. Weiters muss geklärt werden, wie sich die Klimaänderung auf die Bodenerosion auswirken kann. Flachgründige Erosionsprozesse an Grashängen im Gebirge sollten in Detailstudien mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung und durch ein Monitoring ausgewählter Flächen weiter untersucht werden.
- In Bezug auf die Ökosystemleistungen des Bodens sollten bestehende Ansätze zur Bodenfunktionsbewertung in Hinblick auf den Klimawandel erweitert werden.
- Bei allen genannten Forschungsfragen muss dem Thema der Übertragbarkeit von punktuellen Ergebnissen auf die Fläche besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden.

Je umfassender wir das System Boden in der Zukunft verstehen werden, desto besser können bodengestützte Strategien zur Emissionsminderung und zur Anpassung an den Klimawandel ausgerichtet werden. In Band 3, Kapitel 2 des vorliegenden Reports werden solche Erfordernisse, die jeweils auch einen Bezug zum Boden haben, in Bezug auf Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Wasserwirtschaft, Gewässer- wie Naturschutz, natürliche Ökosysteme und Biodiversität konkretisiert.

5.8 Literaturverzeichnis
5.8 References

Anderl, M., Freudenschuß, A., Friedrich, A., Göttlicher, S., Köther, T., Kriech, M., Kuschel, V., Lampert, C., Pazdernik, K., Poupa, S., Purzner, M., Stranner, G., Schwaiger, E., Seuss, K., Weiss, P., Wieser, M., Zechmeister, A., Zethner, G., 2011. Austria's National Inventory Report 2011. Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and under the Kyoto Protocol (REP-0308). Umweltbundesamt, Wien, Österreich.

Anderl, M., Freudenschuß, A., Friedrich, A., Haider, S., Jobstmann, H., Köther, T., Kriech, M., Kuschel, V., Lampert, C., Pazdernik, K., Poupa, S., Purzner, M., Sporer, M., Schodl, B., Stranner, G., Schwaiger, E., Seuss, K., Weiss, P., Wieser, M., Zechmeister, A., Zethner, G., 2012. Austria's National Inventory Report 2012. Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and under the Kyoto Protocol (REP-0381). Umweltbundesamt, Wien, Österreich.

Anderl, M., Freudenschuß, A., Friedrich, A., Haider, S., Jobstmann, H., Köther, T., Kriech, M., Lampert, C., Pazdernik, K., Poupa, S., Schindlbacher, S., Stranner, G., Schwaiger, E., Seuss, K., Weiss, P., Wieser, M., Zechmeister, A., Zethner, G., 2013. Austria's National Inventory Report 2013. Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and under the Kyoto Protocol (REP-0416). Umweltbundesamt, Wien, Österreich.

ATV-DVWK, 2002. Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden, ATV-DVWK-Regelwerk. Ges. zur Förderung der Abwassertechnik e.V., Hennef, Deutschland.

Bachmann, J., Guggenberger, G., Baumgartl, T., Ellerbrock, R.H., Urbanek, E., Goebel, M.-O., Kaiser, K., Horn, R., Fischer, W.R., 2008. Physical carbon-sequestration mechanisms under special consideration of soil wettability. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 171, 14–26. doi:10.1002/jpln.200700054

Bahn, M., Janssens, I.A., Reichstein, M., Smith, P., Trumbore, S.E., 2010. Soil respiration across scales: towards an integration of patterns and processes. New Phytologist 186, 292–296. doi:10.1111/j.1469-8137.2010.03237.x

Bahn, M., Rodeghiero, M., Anderson-Dunn, M., Dore, S., Gimeno, C., Drosler, M., Williams, M., Ammann, C., Berninger, F., Flechard, C., Jones, S., Balzarolo, M., Kumar, S., Newesely, C., Priwitzer, T., Raschi, A., Siegwolf, R., Susiluoto, S., Tenhunen, J., Wohlfahrt, G., Cernusca, A., 2008. Soil Respiration in European Grasslands in Relation to Climate and Assimilate Supply. Ecosystems 11, 1352–1367. doi:10.1007/s10021-008-9198-0

Bahn, M., Schmitt, M., Siegwolf, R., Richter, A., Brüggemann, N., 2009. Does photosynthesis affect grassland soil-respired CO_2 and its carbon isotope composition on a diurnal timescale? New Phytologist 182, 451–460. doi:10.1111/j.1469-8137.2008.02755.x

Batey, T., 2009. Soil compaction and soil management – a review. Soil Use and Management 25, 335–345. doi:10.1111/j.1475-2743.2009.00236.x

Beniston, M., 2006. Climatic change in the Alps: perspectives and impacts. Wengen, Switzerland.

BFW, 2011. Waldinventur 2007/2009. BFW (Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft).

BFW, 2012. Digitale Bodenkarte von Österreich eBOD [WWW Document]. eBod. URL http://bfw.ac.at/rz/bfwcms2.web?dok=7066

Bijay-Singh, 2011. The Nitrogen Cycle: Implications for Management, Soil Health, and Climate Change, in: Singh, B.P., Cowie, A.L., Chan, K.Y. (Eds.), Soil Health and Climate Change, Soil Biology. Springer, Berlin Heidelberg, Germany, pp. 107–129.

Blum, W.E.H., 2007. Bodenkunde in Stichworten. Gebr.-Borntraeger-Verl.-Buchhandl., Berlin, Deutschland.

Blume, H.-P., Horn, R., Thiele-Bruhn, S. (Eds.), 2010a. Handbuch des Bodenschutzes. Bodenökologie und Bodenbelastung. Vorbeugende und abwehrende Schutzmaßnahmen, 4., überarb. Aufl., Ecomed Biowissenschaften. Wiley-VCH, Weinheim, Deutschland.

Blume, H.-P., Brümmer, G.W., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretzschmar, R., Stahr, K., Thiele-Bruhn, S., Welp, G., Wilke, B.-M., Scheffer, F., Schachtschabel, P., 2010b. Lehrbuch der Bodenkunde. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Deutschland.

BMLFUW, 2006. Richtlinien für die sachgerechte Düngung. Anleitung zur Interpretation von Bodenuntersuchungsergebnissen in der Landwirtschaft (6. Auflage). Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, Österreich.

BMLFUW, 2007. Hydrologischer Atlas Österreichs. 3. Lieferung. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, Österreich.

BMLFUW, 2008. Forschungsbedarf zu Bodengefährdung und Wasserhaushalt, Workshop „Boden und Wasser". Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, Österreich.

BMLFUW, 2011. Grüner Bericht 2011. Bericht über die Situation der österreichischen Land- und Forstwirtschaft. Grüner Bericht gemäß §9 des Landwirtschaftsgesetzes BGBl. Nr. 375/1992. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, Österreich.

BMLFUW, 2012. Die österreichische Strategie zur Anpassung an den Klimawandel. Teil 1 – Kontext. Vorlage zur Annahme im Ministerrat. BMLFUW (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft), Wien, Österreich.

BMLFUW, 2013. Bodenfunktionsbewertung: Methodische Umsetzung der ÖNORM L 1076. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien Österreich.

BMU, 2007. Climate Change in the Alps. Facts - Impacts - Adaptation. Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU), Berlin, Germany.

Böhm, R., 2010. Harte und weiche Fakten zum Klimawandel, in: BLMFUW, OWAV (Eds.), Auswirkungen des Klimawandels auf die Österreichische Wasserwirtschaft, Tagungspublikation 24./25. Juni 2010, BOKU, Wien, Österreich, pp. 53–70.

Bohner, A., 2012. Grassland soils – properties and functions. Local land & soil news 42/43, 7–9.

Bohner, A., Herndl, M., 2011. Einfluss einer Nutzungsintensivierung auf Wurzelmasse und Wurzelverteilung im Grünlandboden., in: 1. Tagung der Österreichischen Gesellschaft für Wurzelforschung.,LFZ Raumberg-Gumpenstein Österreich, pp. 35–44.

Bohner, A., Huemer, C., Schaumberger, J., Liebhard, P., 2012. Einfluss der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung und des Reliefs auf den Nährstoffgehalt im Oberboden mit besonderer Berücksichtigung des Phosphors, in: 3. Umweltökologisches Symposium, Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft, Raumberg-Gumpenstein, Österreich, pp. 91–100.

Bork, H.-R., Schmidtchen, G., Dotterweich, M., 2003. Bodenbildung, Bodenerosion und Reliefentwicklung im Mittel- und Jungholozän Deutschlands. Forschungen zur Deutschen Landeskunde 253, Deutsche Akademie für Landeskunde, Flensburg, Deutschland.

Boyd, J., Banzhaf, S., 2007. What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. Ecological Economics 63, 616–626. doi:10.1016/j.ecolecon.2007.01.002

Brandstetter, A., Wenzel, W., 1997. Bodengefüge, in: Blum, W.E.H., Klaghofer, E., Köchl, A., Ruckenbauer, P. (Eds.), Bodenschutz in Österreich. Bundesamt und Forschungszentrum für Landwirtschaft, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Wien, Österreich, pp. 46–54.

Brunetti, M., Colacino, M., Maugeri, M., Nanni, T., 2001. Trends in the daily intensity of precipitation in Italy from 1951 to 1996. International Journal of Climatology 21, 299–316. doi:10.1002/joc.613

Buffoni, L., Maugeri, M., Nanni, T., 1999. Precipitation in Italy from 1833 to 1996. Theoretical and Applied Climatology 63, 33–40. doi:10.1007/s007040050089

Bunning, S., Jiménez, J.J., 2003. Indicators and Assessment of Soil Biodiversity/Soil Ecosystem Functioning for Farmers and Governments. Paper presented at the OECD Expert Meeting on indicators of Soil Erosion and Soil Biodiversity, 25-28 March 2003, Rome, Italy.

Bunza, G., 1996. Abfluss- und Abtragsprozesse in Wildbacheinzugsgebieten: Grundlagen zum integralen Wildbachschutz, Schriftenreihe des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft. Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, München, Deutschland.

Butterbach-Bahl, K., Baggs, E.M., Dannenmann, M., Kiese, R., Zechmeister-Boltenstern, S., 2013. Nitrous oxide emissions from soils: how well do we understand the processes and their controls? Phil. Trans. R. Soc. B 368. doi:10.1098/rstb.2013.0122

Cannone, N., Sgorbati, S., Guglielmin, M., 2007. Unexpected impacts of climate change on alpine vegetation. Frontiers in Ecology and the Environment 5, 360–364. doi:10.1890/1540-9295(2007)5[360:UIOCCO]2.0.CO;2

CEC (Commission of the European Communities), 2006. Thematic Strategy for Soil Protection (Final communication No. COM(2006)231 final), Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee, and the Committees of the Region. Commission of the European Communities (CEC), Brussels, Belgium.

CEC (Commission of the European Communities), 2010. Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC (Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC). Commission of the European Communities (CEC), Brussels, Belgium.

Chen, W., Wolf, B., Zheng, X., Yao, Z., Butterbach-Bahl, K., Brüggemann, N., Liu, C., Han, S., Han, X., 2011. Annual methane uptake by temperate semiarid steppes as regulated by stocking

rates, above ground plant biomass and topsoil air permeability. Global Change Biology 17, 2803–2816. doi:10.1111/j.1365-2486.2011.02444.x

Chmielewski, F.M., 2007. Folgen des Klimawandels für die Land- und Forstwirtschaft. In: Endlicher, W.; Gerstengarbe, F.W. (Hrsg.): Der Klimawandel – Einblicke, Rückblicke und Ausblicke. Eigenverlag, Potsdam, Deutschland.

Cosandey, C., Andréassian, V., Martin, C., Didon-Lescot, J.F., Lavabre, J., Folton, N., Mathys, N., Richard, D., 2005. The hydrological impact of the Mediterranean forest: a review of French research. Journal of Hydrology 301, 235–249. doi:10.1016/j.jhydrol.2004.06.040

Crutzen, P.J., Stoermer, E.F., 2000. The „Anthropocene". Global Change Newsletter 41, 17–18.

D'Asaro, F., D'Agostino, L., Bagarello, V., 2007. Assessing changes in rainfall erosivity in Sicily during the twentieth century. Hydrological Processes 21, 2862–2871. doi:10.1002/hyp.6502

Dawson, T.P., Berry, P.M., Kampa, E., 2003. Climate change impacts on freshwater wetland habitats. Journal for Nature Conservation 11, 25–30. doi:10.1078/1617-1381-00031

De Luis, M., González-Hidalgo, J.C., Longares, L.A., 2010. Is rainfall erosivity increasing in the Mediterranean Iberian Peninsula? Land Degradation & Development 21, 139–144. doi:10.1002/ldr.918

De Vries, W., Solberg, S., Dobbertin, M., Sterba, H., Laubhann, D., van Oijen, M., Evans, C., Gundersen, P., Kros, J., Wamelink, G.W.W., Reinds, G.J., Sutton, M.A., 2009. The impact of nitrogen deposition on carbon sequestration by European forests and heathlands. Forest Ecology and Management 258, 1814–1823. doi:10.1016/j.foreco.2009.02.034

Dersch, G., 1994. Stickstoffdüngerwirkung bei unterschiedlicher Wasserversorgung. Blick ins Land 2, 20–21.

Dersch, G., 2007. Qualitätsdüngung bei Weizen: Auf Witterungssituation Rücksicht nehmen. Der Pflanzenarzt 5, 24–25.

Dersch, G., Böhm, K., 2001. Effects of agronomic practices on the soil carbon storage potential in arable farming in Austria. Nutrient Cycling in Agroecosystems 60, 49–55. doi:10.1023/A:1012607112247

Diaz, H.F., Grosjean, M., Graumlich, L., 2003. Climate variability and change in high elevation regions: past, present and future. Climatic Change 59, 1–4. doi:10.1023/A:1024416227887

Diepenbrock, W., Ellmer, F., Léon, J., 2009. Ackerbau, Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung. Ulmer, Stuttgart (Hohenheim), Deutschland.

Djukic, I., 2011. Climate Change Impacts on Soils of the Austrian Limestone Alps (Dissertation). Universität für Bodenkultur, Institut für Bodenforschung, Wien, Österreich.

Djukic, I., Zehetner, F., Tatzber, M., Gerzabek, M.H., 2010. Soil organic-matter stocks and characteristics along an Alpine elevation gradient. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 173, 30–38. doi:10.1002/jpln.200900027

Djukic, I., Zehetner, F., Watzinger, A., Horacek, M., Gerzabek, M.H., 2013. In situ carbon turnover dynamics and the role of soil microorganisms therein: a climate warming study in an Alpine ecosystem. FEMS Microbiol. Ecol. 83, 112–124. doi:10.1111/j.1574-6941.2012.01449.x

Don, A., Bärwolff, M., Kalbitz, K., Andruschkewitsch, R., Jungkunst, H.F., Schulze, E.-D., 2012. No rapid soil carbon loss after a windthrow event in the High Tatra. Forest Ecology and Management 276, 239–246. doi:10.1016/j.foreco.2012.04.010

Duboc, O., Zehetner, F., Djukic, I., Tatzber, M., Berger, T.W., Gerzabek, M.H., 2012. Decomposition of European beech and Black pine foliar litter along an Alpine elevation gradient: Mass loss and molecular characteristics. Geoderma 189–190, 522–531. doi:10.1016/j.geoderma.2012.06.018

EEA, 1999. Environment in the European Union at the Turn of the Century. EEA (European Environment Agency), Copenhagen, Denmark.

EEA, 2000. Down to earth: Soil degradation and sustainable development in Europe - A challenge for the 21st century — European Environment Agency (EEA) (Environmental Issue Report No. 16). EEA, Copenhagen, Denmark.

EEA, 2009. Regional climate change and adaptation — The Alps facing the challenge of changing water resources (EEA Report No 8). European Environment Agency (EEA), Copenhagen, Denmark.

EEA, OPOCE, 2009. Water resources across Europe — confronting water scarcity and drought (EEA Report No. 2). European Environment Agency (EEA), Office for Official Publications of the European Communities (OPOCE), Copenhagen, Denmark.

Egli, M., Mirabella, A., Sartori, G., Zanelli, R., Bischof, S., 2006. Effect of north and south exposure on weathering rates and clay mineral formation in Alpine soils. CATENA 67, 155–174. doi:10.1016/j.catena.2006.02.010

Egli, M., Sartori, G., Mirabella, A., Favilli, F., Giaccai, D., Delbos, E., 2009. Effect of north and south exposure on organic matter in high Alpine soils. Geoderma 149, 124–136. doi:10.1016/j.geoderma.2008.11.027

Eitzinger, J., Kersebaum, K.C., Formayer, H., 2009. Landwirtschaft im Klimawandel: Auswirkungen und Anpassungsstrategien für die Land- und Forstwirtschaft in Mitteleuropa. Agrimedia, Clenze, Germany.

Ekschmitt, K., Kandeler, E., Poll, C., Brune, A., Buscot, F., Friedrich, M., Gleixner, G., Hartmann, A., Kästner, M., Marhan, S., Miltner, A., Scheu, S., Wolters, V., 2008. Soil-carbon preservation through habitat constraints and biological limitations on decomposer activity. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 171, 27–35. doi:10.1002/jpln.200700051

Englisch, M., Kilian, W., Starlinger, F., 2001a. Forstliche Standortkartierung in Österreich. Mitteilungen der Bodenkundlichen Gesellschaft 62, 3–38.

Englisch, M., Kilian, W., Starlinger, F., 2001b. Bodenaufnahmesysteme in Österreich: Bodeninformationen für Land- Forst-, Wasser- und Abfallwirtschaft, Naturschutz-, Landschafts-, Landes- und Raumplanung, Agrarstrukturelle Planung, Bodensanierung und -regeneration sowie Universitäten, Schulen und Bürger. Mitteilungen der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft 62, zugleich eine Publikation des Umweltbundesamtes. Österreichische Bodenkundliche Gesellschaft, Umweltbundesamt, Wien, Österreich.

Erhardt, E., Hartl, W., Feichtinger, F., 2003. Nährstoffflüsse im Ackerbau bei Kompostdüngung im Vergleich mit mineralischer Düngung – Ergebnisse der Lysimeteranlage Lobau. Presented at the 10. Gumpensteiner Lysimetertagung, IKT-Institut für Kulturtechnik, p. 6.

EROSTAB (2013a): Analyse der Ursachen / Prozesswirkungsketten der rezenten Zunahme von Bodenerosionserscheinungen in Einheiten der hochmontanen bis alpinen Stufe an ausgewählten Testgebieten in Westösterreich – EROSTAB-Handbuch. Florineth F., Kammerlander J., Kohl B. (ed.), Kolb Ch., Lotter M., Markart G., Rauch H.P., Schaffer R., Sotier B., Tilch N., Thannen v.d. M., Weissteiner C.; unveröffentlichter Projektbericht – BML-FUW Lebensministerium.

EROSTAB (2013b): Analyse der Ursachen / Prozesswirkungsketten der rezenten Zunahme von Bodenerosionserscheinungen in Einheiten der hochmontanen bis alpinen Stufe an ausgewählten Testgebieten in Westösterreich – EROSTAB-Gebietsvergleich. Florineth F., Kammerlander J., Kohl B. (ed.), Kolb Ch., Lotter M., Markart G., Rauch H.P., Schaffer R., Sotier B., Tilch N., Thannen v.d. M., Weissteiner C.; unveröffentlichter Projektbericht – BMLFUW Lebensministerium.

European Commission, 2008. Review of existing information on the interrelation between soil and climate change (CLIMSOL) (Technical Report No. 2008-048). European Commission.

Fink, J., 1969. Nomenklatur und Systematik der Bodentypen Österreichs. Mitteilungen der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft 13, 95.

Finzi, A.C., Norby, R.J., Calfapietra, C., Gallet-Budynek, A., Gielen, B., Holmes, W.E., Hoosbeek, M.R., Iversen, C.M., Jackson, R.B., Kubiske, M.E., Ledford, J., Liberloo, M., Oren, R., Polle, A., Pritchard, S., Zak, D.R., Schlesinger, W.H., Ceulemans, R., 2007. Increases in nitrogen uptake rather than nitrogen-use efficiency support higher rates of temperate forest productivity under elevated CO_2. PNAS 104, 14014–14019. doi:10.1073/pnas.0706518104

Fisher, R.F., Binkley, D., 2000. Ecology and Management of Forest Soils. John Wiley & Sons.

Flöck, G., Geitner, C., Wiegand, C., 2013. Veränderungen flachgründiger Abtragsflächen auf der Engalm (Karwendel, Tirol) über die Jahre 1960 bis heute. Mitteilungen der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft 80, 57-63.

Fox, D.M., Darboux, F., Carrega, P., 2007. Effects of fire-induced water repellency on soil aggregate stability, splash erosion, and saturated hydraulic conductivity for different size fractions. Hydrological Processes 21, 2377–2384. doi:10.1002/hyp.6758

Freibauer, A., Rounsevell, M.D., Smith, P., Verhagen, J., 2004. Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe. Geoderma 122, 1–23. doi:10.1016/j.geoderma.2004.01.021

Freudenschuß, A., Sedy, K., Zethner, G., Spiegel, H., 2010. Arbeiten zur Evaluierung von ÖPUL-Maßnahmen hinsichtlich ihrer Klimawirksamkeit: Schwerpunkt agrarische Bewirtschaftung (REP-0290). Umweltbundesamt, Wien, Österreich.

Galloway, J.N., Cowling, E.B., 2002. Reactive Nitrogen and The World: 200 Years of Change. AMBIO: A Journal of the Human Environment 31, 64–71. doi:10.1579/0044-7447-31.2.64

Gattinger, A., Muller, A., Haeni, M., Skinner, C., Fliessbach, A., Buchmann, N., Mäder, P., Stolze, M., Smith, P., Scialabba, N.E.-H., Niggli, U., 2012. Enhanced top soil carbon stocks under organic farming. PNAS 109, 18226–18231. doi:10.1073/pnas.1209429109

Gehrig-Fasel, J., Guisan, A., Zimmermann, N.E., 2007. Tree line shifts in the Swiss Alps: Climate change or land abandonment? Journal of Vegetation Science 18, 571–582. doi:10.1111/j.1654-1103.2007.tb02571.x

Geitner, C., 2007. Böden in den Alpen - Ausgewählte Aspekte zur Vielfalt und Bedeutung einer wenig beachteten Ressource, in: Borsdorf, A., Grabherr, G. (Eds.), IGF-Forschungsberichte 1: Internationale Gebirgsforschung. IGF, Innsbruck, Wien, Österreich, pp. 56–67, 82–83.

Geitner, C., Tusch, M., Meißl, G., Kringer, K., Wiegand, C., 2011. Effects of topography on the spatial distribution of soils: basic considerations on interdependencies and data sources with examples from the Eastern Alps. Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementary Issues 55, 127–146. doi:10.1127/0372-8854/2011/0055S3-0055

Gerzabek, M.H., Strebl, F., Tulipan, M., Schwarz, S., 2005. Quantification of organic carbon pools for Austria's agricultural soils using a soil information system. Canadian Journal of Soil Science 85, 491–498. doi:10.4141/S04-083

Gerzabek, M.H., Antil, R.S., Kögel-Knabner, I., Knicker, H., Kirchmann, H., Haberhauer, G., 2006. How are soil use and management reflected by soil organic matter characteristics: a spectroscopic approach. European Journal of Soil Science 57, 485–494. doi:10.1111/j.1365-2389.2006.00794.x

Ghadir, H., Payne, D., 1988. The formation and characteristics of splash following raindrop impact on soil. Journal of Soil Science 39, 563–575. doi:10.1111/j.1365-2389.1988.tb01240.x

Gottfried, M., Pauli, H., Futschik, A., Akhalkatsi, M., Barancok, P., Alonso, J.L.B., Coldea, G., Dick, J., Erschbamer, B., Kazakis, G., Krajci, J., Larsson, P., Mallaun, M., Michelsen, O., Moiseev, M., Moiseev, P., Molau, U., Merzouki, A., Nagy, L., Nakhutsrishvili, G., Pedersen, B., Pelino, G., Puscas, M., Rossi, G., Stanisci, J.-P., Theurillat, Tomaselli, Villar, L., Vittoz, P., Vogiatzakis, I., Grabherr, G., 2012. Continent-wide response of mountain vegetation to climate change. Nature Climate Change Letter 2, 111–115. doi:10.1038/nclimate1329

Götzl, M., Schwaiger, E., Sonderegger, G., Süßenbacher, E., 2011. Ökosystemleistungen und Landwirtschaft. Erstellung eines Inventars für Österreich. (REP-0355). Umweltbundesamt, Wien, Österreich.

Groffman, P.M., Hardy, J.P., Fisk, M.C., Fahey, T.J., Driscoll, C.T., 2009. Climate Variation and Soil Carbon and Nitrogen Cycling Processes in a Northern Hardwood Forest. Ecosystems 12, 927–943. doi:10.1007/s10021-009-9268-y

Hagedorn, F., Martin, M., Rixen, C., Rusch, S., Bebi, P., Zürcher, A., Siegwolf, R.T.W., Wipf, S., Escape, C., Roy, J., Hättenschwiler, S., 2010a. Short-term responses of ecosystem carbon fluxes to experimental soil warming at the Swiss alpine treeline. Biogeochemistry 97, 7–19. doi:10.1007/s10533-009-9297-9

Hagedorn, F., Moeri, A., Walthert, L., Zimmermann, S., 2010b. Kohlenstoff in Schweizer Waldböden – bei Klimaerwärmung eine potenzielle CO_2 -Quelle | Soil organic carbon in Swiss forest soils – a potential CO_2 source in a warming climate. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 161, 530–535. doi:10.3188/szf.2010.0530

Hagedorn, F., Mulder, J., Jandl, R., 2010c. Mountain soils under a changing climate and land-use. Biogeochemistry 97, 1–5. doi:10.1007/s10533-009-9386-9

Hamza, M.A., Anderson, W.K., 2005. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. Soil and Tillage Research 82, 121–145. doi:10.1016/j.still.2004.08.009

Herbst, M., Hörmann, G., 1998. Predicting Effects of Temperature Increase on the Water Balance of Beech Forest – An Application of the „KAUSHA" Model. Climatic Change 40, 683–698. doi:10.1023/A:1005322327635

Hildebrand, E.E., 1987. Die Struktur von Waldböden – ein gefährdetes Fließgleichgewicht. Allgemeine Forst Zeitschrift 16/17, 424–426.

Hillier, J., Brentrup, F., Wattenbach, M., Walter, C., Garcia-Suarez, T., Mila-i-Canals, L., Smith, P., 2012. Which cropland greenhouse gas mitigation options give the greatest benefits in different world regions? Climate and soil-specific predictions from inte-

grated empirical models. Global Change Biology 18, 1880–1894. doi:10.1111/j.1365-2486.2012.02671.x

Hofmann, K., Reitschuler, C., Illmer, P., 2013. Aerobic and anaerobic microbial activities in the foreland of a receding glacier. Soil Biology and Biochemistry 57, 418–426. doi:10.1016/j.soilbio.2012.08.019

Hollaus, A., Katzensteiner, K., Mansberger, R., 2012. Evaluation of Methods Estimating Humus Erosion after Coarse-Scale Disturbances on a Montane Mixed Forest Site in the Northern Limestone Alps, in: Book of Abstracts. Presented at the 4th International Congress of the european Soil Science Societies Eurosoil, 2–6 July 2012, Bari, Italy.

Hovenden, M.J., Newton, P.C.D., Carran, R.A., Theobald, P., Wills, K.E., Vander Schoor, J.K., Williams, A.L., Osanai, Y., 2008. Warming prevents the elevated CO_2-induced reduction in available soil nitrogen in a temperate, perennial grassland. Global Change Biology 14, 1018–1024. doi:10.1111/j.1365-2486.2008.01558.x

Huber, E., Wanek, W., Gottfried, M., Pauli, H., Schweiger, P., Arndt, S.K., Reiter, K., Richter, A., 2007. Shift in soil–plant nitrogen dynamics of an alpine–nival ecotone. Plant Soil 301, 65–76. doi:10.1007/s11104-007-9422-2

Iijima, M., Griffiths, B., Bengough, A.G., 2000. Sloughing of cap cells and carbon exudation from maize seedling roots in compacted sand. New Phytologist 145, 477–482. doi:10.1046/j.1469-8137.2000.00595.x

IPCC, 1997. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Lim, B., Treanton, K., Mamaty, I., Bonduki, Y., Griggs, D.J., Callander, B.A. (Eds.), IPCC/OECD/IEA, Geneva, Switzerland.

IPCC, 2001a. Climate Change 2001: The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J., Da, X., Maskell, K., Johnson, C.A. (Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

IPCC, 2001b. Climate Change 2001: Impacts, Adaption & Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, McCarthy, J.J., Canziani, O.F., Leary, N.A., Dokken, D.J., White, K.S. (Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

IPCC 2006, 2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (Eds.), IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme, Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Japan

IPCC, 2007. Climate Change 2007 (AR4). Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

Katzensteiner, K., Englisch, M., 2007. Sustainable biomass production from forests: lessons from historical experience and challenges for ecological research. Centralblatt für das gesamte Forstwesen 124, 201–214.

Katzensteiner, K., Englisch, M., Nemestothy, K., 2013. Impacts of increased biomass use on soil sustainability in Austria. Proceedings of the Workshop W6.1 Forest bioenergy and soil sustainability at EUROSOIL Congress 2012, Bari, Italy, 40–44.

Kirschbaum, M.U.F., 1995. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage. Soil Biology and Biochemistry 27, 753–760. doi:10.1016/0038-0717(94)00242-S

Kitzler, B., Stingl, V., Zechmeister-Boltenstern, S., De Brujin, A., Kiese, R., Butterbach-Bahl, K., 2009. Anpassung von Waldböden an sich ändernde Klimabedingungen. StartClim2008.G. In: Anpassung an den Klimawandel in Österreich. Umweltbundesamt, Wien, Österreich.

Klik, A., 2003. Einfluss unterschiedlicher Bodenbearbeitung auf Oberflächenabfluss, Bodenabtrag sowie auf Nährstoff- und Pestizidausträge. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 55, 89–96.

Klik, A., Eitzinger, J., 2010. Impact of climate change on soil erosion and the efficiency of soil conservation practices in Austria. The Journal of Agricultural Science 148, 529–541. doi:10.1017/S0021859610000158

Kloss, S., Sass, O., Geitner, C., Prietzel, J., 2012. Soil properties and charcoal dynamics of burnt soils in the Tyrolean Limestone Alps. CATENA 99, 75–82. doi:10.1016/j.catena.2012.07.011

Knorr, W., Prentice, I.C., House, J.I., Holland, E.A., 2005. Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming. Nature 433, 298–301. doi:10.1038/nature03226

Kögel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Flessa, H., Guggenberger, G., Matzner, E., Marschner, B., von Lützow, M., 2008. An integrative approach of organic matter stabilization in temperate soils: Linking chemistry, physics, and biology. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 171, 5–13. doi:10.1002/jpln.200700215

Kommission der Europäischen Gemeinschaften, 2002. Mitteilungen der Kommission an den Rat, das Europäische Parlament, den Wirtschafts- und Sozialausschuss sowie an den Ausschuss der Regionen – Hin zu einer spezifischen Bodenschutzstrategie (KOM(2002) 179 endgültig). Kommission der Europäischen Gemeinschaften, Brüssel, Belgien.

König, T., Kaufmann, R., Scheu, S., 2011. The formation of terrestrial food webs in glacier foreland: Evidence for the pivotal role of decomposer prey and intraguild predation. Pedobiologia 54, 147–152. doi:10.1016/j.pedobi.2010.12.004

Körner, C., 1998. A re-assessment of high elevation treeline positions and their explanation. Oecologia 115, 445–459. doi:10.1007/s004420050540

Körner, C., Schilcher, B., Pelaez-Riedl, S., 1993. Vegetation und Treibhausproblematik: Eine Beurteilung der Situation in Österreich unter besonderer Berücksichtigung der Kohlenstoff-Bilanz, in: ÖAW (Ed.), Bestandsaufnahme anthropogene Klimaänderungen: Mögliche Auswirkungen auf Österreich - mögliche Massnahmen in Österreich; Dokumentation. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich.

Körschens, M., Albert, E., Armbruster, M., Barkusky, D., Baumecker, M., Behle-Schalk, L., Bischoff, R., Čergan, Z., Ellmer, F., Herbst, F., Hoffmann, S., Hofmann, B., Kismanyoky, T., Kubat, J., Kunzova, E., Lopez-Fando, C., Merbach, I., Merbach, W., Pardor, M.T., Rogasik, J., Rühlmann, J., Spiegel, H., Schulz, E., Tajnsek, A., Toth, Z., Wegener, H., Zorn, W., 2013. Effect of mineral and organic fertilization on crop yield, nitrogen uptake, carbon and nitrogen balances, as well as soil organic carbon content and dynamics: results from 20 European long-term field experiments of the twenty-first century. Archives of Agronomy and Soil Science 59, 1017–1040. doi:10.1080/03650340.2012.704548

Kuka, K., 2005. Modellierung des Kohlenstoffhaushaltes in Ackerböden auf der Grundlage bodenstrukturabhängiger

Umsatzprozesse. UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle, Deutschland.

Kutsch, W.L., Bahn, M., Heinemeyer, A., 2009. Soil Carbon Dynamics: An Integrated Methodology. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Kuttler, W., Püllen, H., Dütemeyer, D., Barlag, A.-B., 2012. Unterirdische Wärmeinsel in Oberhausen. Untersuchung subterraner Wärme- und Energieflüsse in verschiedenen Klimatopen. dynaklim-Publikationen 23, Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft (FiW), Aachen, Deutschland.

Lal, R., 2008. Carbon sequestration. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences 363, 815–830.

Larcher, W., 1977. Ergebnisse des IBP-Projekts „Zwergstrauchheide Patscherkofel". Sitzungsberichte der Österreichischen Akademie der Wissenschaften. Wien, Österreich.

Leifeld, J., Angers, D.A., Chenu, C., Fuhrer, J., Kätterer, T., Powlson, D.S., 2013. Organic farming gives no climate change benefit through soil carbon sequestration. PNAS 110, E984–E984. doi:10.1073/pnas.1220724110

Leonelli, G., Pelfini, M., Morra di Cella, U., Garavaglia, V., 2011. Climate Warming and the Recent Treeline Shift in the European Alps: The Role of Geomorphological Factors in High-Altitude Sites. AMBIO 40, 264–273. doi:10.1007/s13280-010-0096-2

Leuzinger, S., Luo, Y., Beier, C., Dieleman, W., Vicca, S., Körner, C., 2011. Do global change experiments overestimate impacts on terrestrial ecosystems? Trends in Ecology & Evolution 26, 236–241. doi:10.1016/j.tree.2011.02.011

Lichtenegger, E., 1997. Bewurzelung von Pflanzen in den verschiedenen Lebensräumen. Spezieller Teil, in: Wurzeln. Bewurzelung von Pflanzen in verschiedenen Lebensräumen. Land Oberösterreich, Oberösterreichisches Landesmuseum, Linz, Österreich, pp 55–331.

Linke, R.B., Bolhàr-Nordenkampf, H.R., Meister, M.H., 2004. Kulturpflanzen im Klimawechsel: Interaktionen von Wasserversorgung und Stickstoffverfügbarkeit im Osten Österreichs. Der Einfluss von erhöhtem CO_2 auf Wachstum und Produktivität landwirtschaftlicher Kulturpflanzen. (Forschungsbericht im Auftrag des Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft No. 1311), Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, Österreich.

Lorz, C., 2008. Ein substratorientiertes Boden-Evolutions-Konzept für geschichtete Bodenprofile: Genese und Eigenschaften von lithologisch diskontinuierlichen Böden. Borntraeger, Berlin, Deutschland.

Luo, Y., Weng, E., 2011. Dynamic disequilibrium of the terrestrial carbon cycle under global change. Trends in Ecology & Evolution 26, 96–104. doi:10.1016/j.tree.2010.11.003

Margesin, R., Jud, M., Tscherko, D., Schinner, F., 2009. Microbial communities and activities in alpine and subalpine soils. FEMS Microbiology Ecology 67, 208–218. doi:10.1111/j.1574-6941.2008.00620.x

Markart, G., Kohl, B., Zanetti, P., 1997. Oberflächenabfluss bei Starkregen – Abflussbildung auf Wald-, Weide- und Feuchtflächen (am Beispiel des oberen Einzugsgebietes der Schesa – Bürserberg, Vorarlberg). Centralblatt für das gesamte Forstwesen 114, 123–144.

Markart, G., Perzl, F., Kohl, B., Luzian, R., Kleemayr, K., Ess, B., Mayerl, J., 2007. 22. und 23. August 2005 – Analyse von Hochwasser- und Rutschungsereignissen in ausgewählten Gemeinden Vorarlbergs. (BFW Dokumentation No. 5). Schriftenreihe des Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft, Wien, Klosterneuburg, Österreich.

Markart, G., Kohl, B., 2009. Wie viel Wasser speichert der Waldboden? Abflussverhalten und Erosion. BFW Praxisinformation 19, 25–26.

Markart, G., Klebinder, K., Kohl, B., Sotier, B., 2011. Niederschlagsretention und Abflussbildung in alpinen Einzugsgebieten. Ingenieurbiologie, Mitteilungsblatt 3, 4–13.

Marschner, B., Brodowski, S., Dreves, A., Gleixner, G., Gude, A., Grootes, P.M., Hamer, U., Heim, A., Jandl, G., Ji, R., Kaiser, K., Kalbitz, K., Kramer, C., Leinweber, P., Rethemeyer, J., Schäffer, A., Schmidt, M.W.I., Schwark, L., Wiesenberg, G.L.B., 2008. How relevant is recalcitrance for the stabilization of organic matter in soils? Journal of Plant Nutrition and Soil Science 171, 91–110. doi:10.1002/jpln.200700049

Mayer, M., Katzensteiner, K., 2012. Impact of forest disturbance on soil respiration in organic soils on calcareous bedrock, in: Book of Abstracts. 4th International Congress of the European Soil Science Societies Eurosoil 2012, 2-6 July 2012, Bari, Italy.

McNeill, J.R., Winiwarter, V., 2004. Breaking the Sod: Humankind, History, and Soil. Science 304, 1627–1629. doi:10.1126/science.1099893

McNeill, J.R., Winiwarter, V. (Eds.), 2010. Soils and societies: perspectives from environmental history. White Horse Press, Isle of Harris, UK.

Mele, P.M., 2011. Soil Biota, Soil Health and Global Change, in: Singh, B.P., Cowie, A.L., Chan, K.Y. (Eds.), Soil Health and Climate Change, Soil Biology. Springer Berlin Heidelberg, pp. 155–177.

Menéndez, S., Barrena, I., Setien, I., González-Murua, C., Estavillo, J.M., 2012. Efficiency of nitrification inhibitor DMPP to reduce nitrous oxide emissions under different temperature and moisture conditions. Soil Biology and Biochemistry 53, 82–89. doi:10.1016/j.soilbio.2012.04.026

Mengel, K., Kosegarten, H., Kirkby, E.A., Appel, T., 2001. Principles of Plant Nutrition. Springer, Dordrecht, Netherlands.

Menzel, A., Fabian, P., 1999. Growing season extended in Europe. Nature 397, 659–659. doi:10.1038/17709

Meusburger, K., Alewell, C., 2008. Impacts of anthropogenic and environmental factors on the occurrence of shallow landslides in an alpine catchment (Urseren Valley, Switzerland). Natural Hazards and Earth System Science 8, 509–520.

Meyer, S., Leifeld, J., Bahn, M., Fuhrer, J., 2012a. Land-use change in subalpine grassland soils: Effect on particulate organic carbon fractions and aggregation. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 175, 401–409. doi:10.1002/jpln.201100220

Meyer, S., Leifeld, J., Bahn, M., Fuhrer, J., 2012b. Free and protected soil organic carbon dynamics respond differently to abandonment of mountain grassland. Biogeosciences 9, 853–865. doi:10.5194/bg-9-853-2012

Michael, A., Schmidt, J., Enke, W., Deutschländer, T., Malitz, G., 2005. Impact of expected increase in precipitation intensities on soil loss—results of comparative model simulations. CATENA 61, 155–164. doi:10.1016/j.catena.2005.03.002

Minerbi, S., Cescatti, A., Cherubini, P., Hellrigl, K., Markart, G., Saurer, M., Mutinelli, C., 2006. La siccita dell'estate 2003 causa di disseccamenti del pino silvestre in val d'Isarco. Forest Observer 2/3: 89-144. Forest Observer 2/3, 89–144.

Murer, E., 2002. Erfassung und Bewertung der Sickerwasserquantität und -qualität im Pilotprojekt zur Grundwassersanierung

in Oberösterreich. Schriftenreihe des Bundesamtes für Wasserwirtschaft 16.

Murer, E., 2009. Bericht über die Überprüfung der Anwendbarkeit von Modellen zur Beurteilung der Bodenverdichtung. (Abschlussbericht, Projekt im Auftrag des Bundesamts für Wasserwirtschaft No. 547-383/112/09). BAW Bundesamt für Wasserwirtschaft, Petzenkirchen, Österreich.

Murer, E., Sisak, I., Baumgarten, A., Strauss, P., 2012. Bewertung der Unterbodenverdichtung von Ackerböden im österreichischen Alpenvorland. Die Bodenkultur 63, 7–15.

Murer, E., Wagenhofer, J., Aigner, F., Pfeffer, M., 2004. Die nutzbare Feldkapazität der mineralischen Böden der landwirtschaftlichen Nutzfläche Österreichs. Schriftenreihe des Bundesamtes für Wasserwirtschaft 20, 72–78.

Mutsch, F., Leitgeb, E., 2009. BioSoil - das europäische Waldboden-Monitoring. BFW Praxisinformation 20, 13–15.

Mutsch, F., Leitgeb, E., Hacker, R., Amann, C., Aust, G., Herzberger, E., Pock, H., Reiter, R., 2013. Projekt BioSoil – Europäisches Waldboden-Monitoring (2006/07) Datenband Österreich Band I: Methodik, Standort- und Bodenbeschreibung, Bodendaten aus Burgenland, Kärnten, Niederösterreich und Oberösterreich, Band II: Bodendaten aus Salzburg, Steiermark, Tirol und Vorarlberg, Deskriptive Statistik. (No. 145 I, II), BWF Berichte. Wien, Österreich.

Nearing, M.A., 2001. Potential changes in rainfall erosivity in the U.S. with climate change during the 21st century. Journal of Soil and Water Conservation 56, 229–232.

Nestroy, O., Danneberg, O.H., Englisch, M., Geszl, A., Hager, H., Herzberger, E., Kilian, W., Nelhiebl, P., Pecina, E., Pehamberger, A., Schneider, W., Wagner, J., 2000. Systematische Gliederung der Böden Österreichs – Österreichische Bodensystematik 2000, Mitteilungen der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft 60.

Nestroy, O., Aust, G., Blum, W.E.H., Englisch, M., Hager, H., Herzberger, E., Kilian, W., Nelhiebel, P., Ortner, G., Pecina, E., Pehamberger, A., Schneider, W., Wagner, J., 2011. Systematische Gliederung der Böden Österreichs: Österreichische Bodensystematik 2000 in der revidierten Fassung von 2011, Mitteilungen der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft 79.

Niedermair, M., Platterer, G., Egger, G., Essl, F., Kohler, B., Zika, M., 2011. Moore im Klimawandel. Studie des WWF Österreich, der Österreichischen Bundesforste und des Umweltbundesamtes. Im Auftrag der Österreichischen Bundesforste AG, Wien, Purkersdorf, Österreich.

Norer, R., 2009. Bodenschutzrecht im Kontext der europäischen Bodenschutzstrategie. NWV Neuer Wissenschaftlicher Verlag, Wien, Graz, Österreich.

ÖNORM, 2013. ÖNORM L 1076 - Bodenfunktionsbewertung.

Pauli, H., Gottfried, M., Dullinger, S., Abdaladze, O., Akhalkatsi, M., Alonso, J.L.B., Coldea, G., Dick, J., Erschbamer, B., Calzado, R.F., Ghosn, D., Holten, J.I., Kanka, R., Kazakis, G., Kollár, J., Larsson, P., Moiseev, P., Moiseev, D., Molau, U., Mesa, J.M., Nagy, L., Pelino, G., Puşcaş, M., Rossi, G., Stanisci, A., Syverhuset, A.O., Theurillat, J.-P., Tomaselli, M., Unterluggauer, P., Villar, L., Vittoz, P., Grabherr, G., 2012. Recent Plant Diversity Changes on Europe's Mountain Summits. Science 336, 353–355. doi:10.1126/science.1219033

Philippot, L., Tscherko, D., Bru, D., Kandeler, E., 2011. Distribution of High Bacterial Taxa Across the Chronosequence of Two Alpine Glacier Forelands. Microbial Ecology 61, 303–312. doi:10.1007/s00248-010-9754-y

Pietsch, J., Kamieth, H., 1991. Stadtböden: Entwicklungen, Belastungen, Bewertung und Planung. Blottner. Taunusstein, Deutschland.

Pritchard, S.G., 2011. Soil organisms and global climate change. Plant Pathology 60, 82–99. doi:10.1111/j.1365-3059.2010.02405.x

Pröll, G., Katzensteiner, K., 2012. Interactions of understory cover, microsite parameters and tree recruitment along a temporal and spatial disturbance gradient in the Austrian northern limestone, in: Book of Abstracts. Presented at the 4th International Congress of the European Soil Science Societies Eurosoil 2012, 2-6 July 2012, Bari, Italy.

Pruski, F.F., Nearing, M.A., 2002. Climate-induced changes in erosion during the 21st century for eight U.S. locations. Water Resources Research 38. doi:10.1029/2001WR000493

Raschauer, B., 2002. Bodenschutzkompetenzen im österreichischen Rechtssystem. Mitteilungen der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft 66, 17–22.

Reay, D.S., 2007. Does heavier rain mean a bigger sink? Nature Reports Climate Change 54–56. doi:10.1038/climate.2007.38

Reichstein, M., Bahn, M., Ciais, P., Frank, D., Mahecha, M.D., Seneviratne, S.I., Zscheischler, J., Beer, C., Buchmann, N., Frank, D.C., Papale, D., Rammig, A., Smith, P., Thonicke, K., van der Velde, M., Vicca, S., Walz, A., Wattenbach, M., 2013. Climate extremes and the carbon cycle. Nature 500, 287–295. doi:10.1038/nature12350

Rippel, R., Stumpf, F., 2008. Auswirkungen der Klimaänderung auf die Bodenerosion durch Wasser in Bayern bis 2050, in: Tagungsband: Boden und Klima im Wandel. Presented at the 5. Marktredwitzer Bodenschutztage, Marktredwitz, pp. 20–27.

Rustad, L., Campbell, J., Marion, G., Norby, R., Mitchell, M., Hartley, A., Cornelissen, J., Gurevitch, J., 2001. A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming. Oecologia 126, 543–562. doi:10.1007/s004420000544

Sala, O.E., Chapin, F.S., Ill, J., Armesto, J.J., Berlow, E., Bloomfield, J., Dirzo, R., Huber-Sanwald, E., Huenneke, L.F., Jackson, R.B., Kinzig, A., Leemans, R., Lodge, D.M., Mooney, H.A., Oesterheld, M., Poff, N.L., Sykes, M.T., Walker, B.H., Walker, M., Wall, D.H., 2000. Global Biodiversity Scenarios for the Year 2100. Science 287, 1770–1774. doi:10.1126/science.287.5459.1770

Sass, O., Heel, M., Leistner, I., Stöger, F., Wetzel, K.-F., Friedmann, A., 2012. Disturbance, geomorphic processes and recovery of wildfire slopes in North Tyrol. Earth Surface Processes and Landforms 37, 883–894. doi:10.1002/esp.3221

Schilling, G., 2000. Pflanzenernährung und Düngung. Ulmer, Stuttgart, Deutschland.

Schindlbacher, A., de Gonzalo, C., Díaz-Pinés, E., Gorría, P., Matthews, B., Inclán, R., Zechmeister-Boltenstern, S., Rubio, A., Jandl, R., 2010. Temperature sensitivity of forest soil organic matter decomposition along two elevation gradients. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences 115. doi:10.1029/2009JG001191

Schindlbacher, A., Wunderlich, S., Borken, W., Kitzler, B., Zechmeister-Boltenstern, S., Jandl, R., 2012. Soil respiration under climate change: prolonged summer drought offsets soil warming effects. Global Change Biology 18, 2270–2279. doi:10.1111/j.1365-2486.2012.02696.x

Schindlbacher, A., Zechmeister-Boltenstern, S., Jandl, R., 2009. Carbon losses due to soil warming: Do autotrophic and heterotrophic soil respiration respond equally? Global Change Biology 15, 901–913. doi:10.1111/j.1365-2486.2008.01757.x

Schmidt, M.W.I., Torn, M.S., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I.A., Kleber, M., Kögel-Knabner, I., Lehmann, J., Manning, D.A.C., Nannipieri, P., Rasse, D.P., Weiner, S., Trumbore, S.E., 2011. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. Nature 478, 49–56. doi:10.1038/nature10386

Scholz, G., Quinton, J.N., Strauss, P., 2008. Soil erosion from sugar beet in Central Europe in response to climate change induced seasonal precipitation variations. CATENA 72, 91–105. doi:10.1016/j.catena.2007.04.005

Schultz, J., 2002. Die Ökozonen der Erde: die ökologische Gliederung der Geosphäre. UTB, Stuttgart, Deutschland.

Schwarz, S., Englisch, M., Aichberger, K., Baumgarten, A., Blum, W.E.H., Danneberg, Glatzel, G., Huber, S., Kilian, W., Klaghofer, W., Nestroy, O., Pehamberger, A., Wagner, J., Gerzabek, M., 2001. Bodeninformationen in Österreich – Aktueller Stand und Ausblick. Mitteilungen der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft 62, 185–219.

Seeber, J., Rief, A., Richter, A., Traugott, M., Bahn, M., 2012. Drought-induced reduction in uptake of recently photosynthesized carbon by springtails and mites in alpine grassland. Soil Biology and Biochemistry 55, 37–39. doi:10.1016/j.soilbio.2012.06.009

Seidl, R., Schelhaas, M.-J., Lexer, M.J., 2011. Unraveling the drivers of intensifying forest disturbance regimes in Europe. Global Change Biology 17, 2842–2852. doi:10.1111/j.1365-2486.2011.02452.x

Singh, B.P., Cowie, A.L., Chan, K.Y., 2011. Soil Health and Climate Change. Springer, Dordrecht, Netherlands.

Sitaula, B.K., Hansen, S., Sitaula, J.I.B., Bakken, L.R., 2000. Effects of soil compaction on N_2O emission in agricultural soil. Chemosphere - Global Change Science 2, 367–371. doi:10.1016/S1465-9972(00)00040-4

Smith, P., Powlson, D., Glendining, M., 1996. Establishing a European GCTE Soil Organic Matter Network (SOMNET), in: Powlson, D.S., Smith, P., Smith, J.U. (Eds.), Evaluation of Soil Organic Matter Models, NATO ASI Series. Springer, Berlin, Deutschland, pp. 81–97.

Smith, P., Powlson, D., Glendining, M., Smith, J., 1997. Potential for carbon sequestration in European soils: preliminary estimates for five scenarios using results from long-term experiments. Global Change Biology 3, 67–79. doi:10.1046/j.1365-2486.1997.00055.x

Somasundaram, S., Rao, T.P., Tatsumi, J., Iijima, M., 2009. Rhizodeposition of Mucilage, Root Border Cells, Carbon and Water under Combined Soil Physical Stresses in Zea mays L. Plant Production Science 12, 443–448.

Spiegel, H., 2012. Impacts of arable management on soil organic carbon and nutritionally relevant elements in the soil-plant system. Habilitationsschrift. University of Natural Resources and Life Sciences (BOKU), Vienna, Austria.

Spiegel, H., Baumgarten, A., Dersch, G., 2006. Neufassung der österreichischen „Richtlinien für die sachgerechte Düngung" unter dem Aspekt von Cross Compliance und ihrer nationalen Umsetzung: Revised form of the" Austrian guidelines for appropriate fertilisation" and the influence of" cross compliance" and its national implementation. Acta agriculturae Slovenica 87, 93–107.

Spiegel, H., Dersch, G., Baumgarten, A., 2010. Long term field experiments-a basis to evaluate parameters of soil fertility, in: New Challenges in Field Crop Production 2010. Proceedings of the Symposium. Slovenian Society for Agronomy, Rogaška Slatina, pp. 76–83.

Spiegel, H., Dersch, G., Hösch, J., Baumgarten, A., 2007. Tillage effects on soil organic carbon and nutrient availability in a long-term field experiment in Austria. Die Bodenkultur 58, 47–58.

Spiegel, H., Robier, J., Springer, Übleis, Dersch, G., 2009. Application of the Nmin soil test in fertilizer recommendations and environment protection in Austria. Nawozy i Nawożenie (Fertilisers and Fertilization), 17–31.

Starnberger, R., Terhorst, B., Rähle, W., Peticzka, R., Haas, J.N., 2009. Palaeoecology of Quaternary periglacial environments during OIS-2 in the forefields of the Salzach Glacier (Upper Austria). Quaternary International 198, 51–61. doi:10.1016/j.quaint.2008.06.011

Stenitzer, E., 1986. Über den Einfluss des Bodenwasserhaushaltes auf den Pflanzenertrag in Trockengebieten – eine Modelluntersuchung. Abfallwirtschaft 6, 245–254.

Stenitzer, E., 1991. Der Bodenwasserhaushalt als Steuerungsgröße für die Grundwasserneubildung. Wasserwirtschaftliche Fachtage „Grundwassersanierung flächenhafter Nitratbelastung", Petzenkirchen, 24.-25.4.1991. Sonderausgabe – Der Förderungsdienst, 63–72.

Stenitzer, E., 2001. Abschätzung der Auswirkung von Neuaufforstungen im Marchfeld auf die Grundwasserneubildung, in: Gebietsbilanzen bei unterschiedlicher Landnutzung. Presented at the 9. Gumpensteiner Lysimetertagung, Bundesanstalt für Alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, Irdning, pp. 93–96.

Stenitzer, E., 2003. Grundwasserneubildung im Trockengebiet, in: Schriftenreihe des Bundesamtes Für Wasserwirtschaft, Band 19. BAW, Wien, Österreich, pp. 80–95.

Stenitzer, E., Hösch, K., 2004. Die Auswirkungen der Klimaänderung auf den Bodenwasserhaushalt und die Erträge im Marchfeld – eine Simulationsstudie, in: ALVA (Ed.), Klimawandel: Auswirkungen auf Umwelt und Agrarproduktion. Presented at the ALVA Jahrestagung, Österr. Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit, Wien, Österreich, pp. 37–41.

Stevnbak, K., Scherber, C., Gladbach, D.J., Beier, C., Mikkelsen, T.N., Christensen, S., 2012. Interactions between above- and belowground organisms modified in climate change experiments. Nature Clim. Change 2, 805–808. doi:10.1038/nclimate1544

Steyrer, G., Krehan, H., 2011. Borkenkäfer-Kalamität 2010: Schäden weiterhin sehr hoch. Forstschutz Aktuell 52, 10–13.

Stöhr, D., 2007. Soils – Heterogeneous at a Microscale., in: Wieser, G., Tausz, M. (Eds.), Trees at Their Upper Limit. Springer, Heidelberg, Germany, pp. 37–56.

Strauss, P., Klaghofer, E., 2006. Austria, in: Boardman, J., Poesen, J. (Eds.), Soil Erosion in Europe. John Wiley & Sons, Ltd, pp. 205–212.

Subke, J.-A., Bahn, M., 2010. On the „temperature sensitivity" of soil respiration: Can we use the immeasurable to predict the unknown? Soil Biology and Biochemistry 42, 1653–1656. doi:10.1016/j.soilbio.2010.05.026

Sutton, M.A., Howard, C.M., Erisman, J.W., Bealey, W.J., Billen, G., Bleeker, A., Bouwman, A.F., Grennfelt, P., van Grinsven, H., Grizzetti, B., 2011. The challenge to integrate nitrogen science and policies, in: Sutton, M.A., Howard, C.M., Erisman, J.W., Grinzetti, B., van Grinsven, H., Grennfelt, P., Bleeker, A., Billen, G. (Eds.), The European Nitrogen Assessment: Sources, Effects and Policy Perspectives. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., pp. 82–96.

Tarnocai, C., Canadell, J.G., Schuur, E. G., Kuhry, P., Mazhitova, G., Zimov, S., 2009. Soil organic carbon pools in the northern

circumpolar permafrost region. Global Biogeochemical Cycles 23, . doi:10.1029/2008GB003327

Tasser, E., Tappeiner, U., Cernusca, A., 2001. Südtirols Almen im Wandel: ökologische Folgen von Landnutzungsänderungen. Europäische Akademie Bozen, Bozen, Italien.

Tasser, E., Mader, M., Tappeiner, U., 2004. Auswirkungen von Bewirtschaftungsänderungen auf die Blaikenbildung im Gebirge. Mitteilungen der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft 72, 193–217

Teepe, R., Brumme, R., Beese, F., Ludwig, B., 2004. Nitrous Oxide Emission and Methane Consumption Following Compaction of Forest Soils. Soil Science Society of America Journal 68, 605–611. doi:10.2136/sssaj2004.6050

Thaler, K., Illmer, P., Gottfried, M., Geitner, C., 2013. Ein alpinnivaler Bodentransekt am Schrankogel (Tirol) – Gradienten und Muster zwischen 2.700 und 3.300 m ü.d.M. Mitteilungen der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft 80, 51–56.

Tscherko, D., Hammesfahr, U., Marx, M.-C., Kandeler, E., 2004. Shifts in rhizosphere microbial communities and enzyme activity of Poa alpina across an alpine chronosequence. Soil Biology and Biochemistry 36, 1685–1698. doi:10.1016/j.soilbio.2004.07.004

Umweltbundesamt, 1998. Fünfter Umweltkontrollbericht 1998. Umweltbundesamt, Wien, Österreich.

UNFCCC United Nations Framework Convention on Climate Change, 1997: Kyoto Protocol, UNFCCC, UN Doc FCCC/CP/1997/7/Add.1, Dec. 10, 1997; 37 ILM 22 (1998), http://unfccc.int/essential_background/kyoto_protocol/background/items/1351.php

Vacik, H., Arndt, N., Arpaci, A., Koch, V., Mueller, M., Gossow, H., 2011. Characterisation of forest fires in Austria. Austrian Journal of Forest Science 128, 1–31.

Van der Meer, M., Hagedorn, F., Schweingruber, F.H., Rigling, A., Moiseev, P.A., 2004. Alpine timberline dynamics in the Southern Urals (Russia). Die Erde 135, 151–174.

Van Husen, D., 1987. Die Ostalpen in den Eiszeiten. Geologische Bundesantalt, Wien, Österreich

Velthof, G.L., Mosquera, J., 2011. The impact of slurry application technique on nitrous oxide emission from agricultural soils. Agriculture, Ecosystems & Environment 140, 298–308. doi:10.1016/j.agee.2010.12.017

Verstraeten, G., Poesen, J., Demarée, G., Salles, C., 2006. Long-term (105 years) variability in rain erosivity as derived from 10-min rainfall depth data for Ukkel (Brussels, Belgium): Implications for assessing soil erosion rates. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 111. doi:10.1029/2006JD007169

Wagner, A.O., Hofmann, K., Prem, E., Illmer, P., 2012. Methanogenic activities in alpine soils. Folia Microbiologica 57, 371–373. doi:10.1007/s12223-012-0145-2

Wardle, D.A., 2002. Communities and ecosystems: linking the aboveground and belowground components. Princeton University Press, Princeton, NJ, USA.

Wardle, D.A., Walker, L.R., Bardgett, R.D., 2004. Ecosystem Properties and Forest Decline in Contrasting Long-Term Chronosequences. Science 305, 509–513. doi:10.1126/science.1098778

Weiss, P., Schieler, K., Schadauer, K., Rdunsky, K., Englisch, M., 2000. Die Kohlenstoffbilanz des österreichischen Waldes und Betrachtungen zum Kyoto-Protokoll, Monographien. Umweltbundesamt, Wien, Österreich.

Whipkey, R.Z., 1962. Subsurface Stormflow from Forested Slopes, in: ASAE - Drainage Research Committee (Ed.), Measuring Saturated Hydraulic Conductivity of Soils. American Society of Agricultural Engineers, pp. 74–85.

Wiegand, C., Geitner, C., 2012. Flachgründiger Abtrag auf Wiesen- und Weideflächen in den Alpen (Blaiken) – Wissensstand, Datenbasis und Forschungsbedarf. Mitteilungen der Österreichischen Geographischen Gesellschaft 152, 130–162. doi:10.1553/moegg152s130

Wiegand, C., Geitner, C., 2013. Investigations into the distribution and diversity of shallow eroded areas on steep grasslands in Tyrol (Austria). Erdkunde 67, 325–343. doi:10.3112/erdkunde.2013.04.03

Wiegand, C., Rutzinger, M., Heinrich, K., Geitner, C., 2013. Automated Extraction of Shallow Erosion Areas Based on Multi-Temporal Ortho-Imagery. Remote Sensing 5, 2292–2307. doi:10.3390/rs5052292

Wieser, G., Tausz, M., 2007. Trees at their Upper Limit: Treelife Limitation at the Alpine Timberline. Springer, Dordrecht, Netherlands.

Winiwarter, V., Gerzabek, M.H., Baumgarten, A., Blum, W.E.H., Butterbach-Bahl, K., Cushman, G., Englisch, M., Feller, C., Fiebig, M., Frossard, E., Haberl, H., Huber, S., Kandeler, E., Katzensteiner, K., Kaul, K., Krausmann, F., Langthaler, E., Showers, K., Spiegel, H., Winiwarter, W., 2012. Chapter I: Endangered Soils: A long-term view of the natural and social ramifications of biomass production in agriculture and forestry., in: Winiwarter, V., Gerzabek, M.H. (Eds.), Challenge of Sustaining Soils: Natural and Social Ramifications of Biomass Production in a Changing World, Interdisciplinary Perspectives. Austrian Academy of Sciences Press, Vienna, Austria.

Zech, W., Hintermaier-Erhard, G., 2002. Böden der Welt. Springer Spektrum. Berlin, Heidelberg, Deutschland.

Zechmeister-Boltenstern, S., Michel, K., Pfeffer, M., 2010. Soil microbial community structure in European forests in relation to forest type and atmospheric nitrogen deposition. Plant and Soil 343, 37–50. doi:10.1007/s11104-010-0528-6

Zehetner, F., Lair, G.J., Gerzabek, M.H., 2009. Rapid carbon accretion and organic matter pool stabilization in riverine floodplain soils. Global Biogeochemical Cycles 23. doi:10.1029/2009GB003481

Zhang, G.-H., Nearing, M.A., Liu, B.-Z., 2005. Potential effects of climate change on rainfall erosivity in the Yellow River basin in China. Transactions ASAE 48, 511–517.

Zollinger, B., Alewell, C., Kneisel, C., Meusburger, K., Gärtner, H., Brandová, D., Ivy-Ochs, S., Schmidt, M.W.I., Egli, M., 2013. Effect of permafrost on the formation of soil organic carbon pools and their physical–chemical properties in the Eastern Swiss Alps. CATENA 110, 70–85. doi:10.1016/j.catena.2013.06.010

Band 2 Kapitel 6: Der Einfluss des Klimawandels auf die Anthroposphäre

Volume 2 Chapter 6: Climate Change Impacts on the Anthroposphere

Koordinierende Leitautoren

Martin König, Wolfgang Loibl, Robert Steiger

LeitautorInnen

Horst Aspöck, Birgit Bednar-Friedl, Karl-Michael Brunner, Willi Haas, Karl-Michael Höferl, Matthias Huttenlau, Julia Walochnik, Ulli Weisz

Beiträge von

Reinhard Mechler, Hanns Moshammer, Walter Seher

Für den Begutachtungsprozess

Hermann Lotze-Campen

Inhalt

ZUSAMMENFASSUNG

Die Klimafolgen für die Anthroposphäre sind signifikant und führen mit hoher Wahrscheinlichkeit neben strukturellen Schäden auch zu erhöhten Gefahren für die menschliche Gesundheit. Dabei werden vor allem arme, sozial schwächere, ältere oder chronisch kranke Bevölkerungsschichten besonders unter der mit hoher Wahrscheinlichkeit erwarteten höheren Frequenz und Stärke von Hitzewellen leiden. Ein unterschiedlich hohes zusätzliches Potenzial für die Ausbreitung von bislang hier nicht verbreiteten Infektionskrankheiten besteht mit hoher Wahrscheinlichkeit ebenso wie ein Potenzial für die (weitere) Ausbreitung allergener Pflanzen und Tiere.

Durch den Klimawandel wird mit hoher Wahrscheinlichkeit zusätzlicher Migrationsdruck auf Österreich aus Entwicklungs- und Schwellenländern ausgelöst, dessen Auswirkungen von der politischen Gestaltung auf EU- und nationaler Ebene abhängen. Ebenfalls könnte der Klimawandel einen innereuropäischen Migrationsdruck aus dem von Hitze (wie auch ökonomischen Nachteilen) stärker betroffenen Süd- und Südosteuropa verstärken. Die ökonomischen Auswirkungen des Klimawandels in Österreich werden mit Sicherheit Gewinner und Verlierer nach sich ziehen. Genauere Aussagen sind zum jetzigen Zeitpunkt nur für einige Sektoren möglich, die bereits näher untersucht wurden. Während Elektrizitätswirtschaft und Landwirtschaft bis 2050 sowohl im Sektor selbst (direkte Effekte) als auch nachgelagert (indirekte Effekte) wahrscheinlich nur geringe BIP-Ausschläge zeigen werden, sind für den Tourismus-Sektor sehr wahrscheinlich maßgebliche Verschiebungen innerhalb des Sektors (vom Winter- zum Sommertourismus) sowie zwischen den Regionen – vom Winter-dominierten Tourismus im Westen zum stärker diversifizierten Tourismus im Osten Österreichs – und auch in anderen vor- und nachgelagerten Sektoren (z. B. Energie und Gastronomie) zu erwarten.

Die in den letzten dreißig Jahren signifikant ansteigenden Schäden durch Naturgefahren bzw. extreme Wetterereignisse können nur zu einem Teil auf tatsächlich steigende Trends in Frequenz und / oder Intensität von Ereignissen zurückgeführt werden. Ein Gros der Schäden war klar bedingt durch ein Anwachsen der exponierten Sachwerte. Besonders schadensträchtige Ereignisse waren dabei Hochwasser gefolgt von Lawinen, während die höchsten Opferzahlen während der Hitzewelle 2003 verzeichnet wurden. Eine wesentliche Rolle für das Risikomanagement spielen entsprechende Rechtsnormen (Bau- und Raumordnung) und Schutzmaßnahmen.

Die Siedlungsräume in Österreich werden zudem von sommerlichen Hitzewellen sowie in Einzelfällen auch von Beeinträchtigungen bei der Trinkwasserentstehung betroffen sein. Die Verkehrsinfrastruktur ist in Österreich besonders von Massenbewegungen und Hochwässern betroffen. Dass die entsprechenden schadensauslösenden Niederschläge in Zukunft zunehmen werden, ist zu erwarten. Wie stark diese Zunahme genau sein wird, gilt derzeit noch als unsicher. Sehr wahrscheinlich ist hingegen eine zusätzliche Herausforderung für die Energieinfrastruktur durch vermehrt auftretende Hitzewellen bzw. Dürren. Gleichzeitig erhöhte Nachfrage (vor allem für Kühlungszwecke), stockende Bereitstellung (Niedrigwasser bzw. Kühlwassermangel) und Gefahren für das Verteilernetz (Gewitter, oftmals am Ende sommerlicher Hitze-Dürreperioden, wenn die Nachfrage hoch ist – Gefahr von Überschlagsspannung) gefährden die Versorgungssicherheit mit Elektrizität und erhöhen die Gefahr von Black-Outs.

SUMMARY

Climate change impacts for the Anthroposphere are significant and it is very likely that these impacts are leading to structural damages as well as enhanced threats to human health. Particularly, the poor, elderly and chronically ill will suffer from the higher frequency and magnitude of summer heat waves. A varying potential for the spread of yet non-endemic infectious diseases is very likely, as well as an increased potential for the (further) extension of allergenic plant and animal species.

Climate change will very likely trigger increased migration from developing and newly industrialized countries to Europe. To which extent this will lead to more immigration to Austria will depend on policies at the EU- and national levels.

The economic impacts of climate change in Austria will very likely produce both winners and losers. However, more precise assessments of the economic impacts are currently only available for certain sectors. The agriculture and electricity production sectors show very moderate GDP-alterations directly in their sectors as well as downstream. The tourism sector is very likely to exhibit stronger changes within the sector and also with other up- and downstream sectors (e. g., energy supply and gastronomy). Within the sector a shift is expected from winter to summer tourism as well as regionally from the west (dominated by winter tourism) to the east with seasonally more diversified tourism.

The natural hazard- and weather-related damages observed during the last 30 years depend only to a certain extent on higher frequency and magnitude of extreme weather events. A large share of the damage increase is related to growing wealth and higher assets of the population. The most damaging events have been floods followed by avalanches, while the largest hu-

man casualties have been induced by heat waves. Regulations and planning standards (e. g., building-regulation and spatial planning) play a fundamental role in hazard control and disaster risk reduction.

Settlement areas in Austria will very likely be most affected by more intense heat waves, while some regions will be further burdened by constraints in drinking water supply. Traffic infrastructures in Austria are very vulnerable to mass movements and flooding, triggered by heavy precipitation events, which are expected to increase in the future. To which extent frequency and magnitude of such events may increase remains uncertain. Instead, the challenge for energy infrastructures in a warmer and during summer potentially dryer Austria is very likely to be substantial. Higher energy demand during heat waves corresponds with supply constraints (due to less effective cooling water supply), while the threat for power distribution networks because of flash-overs will be particularly high especially during thunder storms at the end of summer heat waves and droughts when cooling demand is at peak.

KERNAUSSAGEN

- Gesundheit

Eine sehr wahrscheinliche Zunahme von Hitzetagen führt zu starken zusätzlichen Belastungen in den besonders gegenüber Herz-Kreislauf-Erkrankungen sensitiven Bevölkerungsschichten (Ältere und chronisch Kranke) und damit zu einer höheren Mortalität. Das Jahr 2003 lieferte einen Vorgriff auf künftig vermehrt vorkommende Hitzesommer. Zwischen 180[1] und 330[2] zusätzliche hitzebedingte Todesfälle wurden im Rekordsommer 2003 in Österreich verzeichnet.

Eine sehr wahrscheinliche (z. T. bereits beobachtete) Ausbreitung von nicht-heimischen Tier- und Pflanzenarten sowie Mikroorganismen durch den Klimawandel (z. T. ermöglicht über Luft- und Seeweg / Handelsströme bzw. Tourismus) erhöht das Risiko der Ausbreitung von bislang hierzulande nicht vorkommenden Infektionskrankheiten. Durch Vektoren (z. B. Zecken, Stechmücken, Sandmücken, Nagetiere etc.) übertragene Erreger von Krankheiten (zahlreiche Virusinfektionen, wie z. B. Denguefieber, Krim-Kongo-Hämorrhagisches Fieber, oder auch parasitäre Infektionen, wie z. B. die Leishmaniosen) können eingeschleppt werden und sich weiter ausbreiten. Aber auch bereits seit langer Zeit vorkommende durch Vektoren übertragene Krankheitserreger (z. B. das FSME-Virus) werden eine Veränderung ihrer Verbreitung erfahren. So wird sich die Aktivität der bereits heimischen Zecken sehr wahrscheinlich bei steigenden Durchschnittstemperaturen sowohl regional als auch saisonal verändern (Ausbreitung in höher gelegene Bergregionen und Aktivität auch im Winterhalbjahr, hingegen weniger Zeckenaktivität in heißen Sommern im Flachland). Auch durch Trinkwasser und Lebensmittel übertragene Krankheitserreger (z. B. Salmonellen) sind temperaturabhängig und können sich bei höheren Durchschnittstemperaturen entsprechend leichter ausbreiten.

Eine Ausbreitung von Tieren und Pflanzen, die beim Menschen Allergien auslösen, kann aufgrund von Beobachtungen und Modellierungen als sehr sicher angenommen werden. Solche Allergene sind z. B. das beifußblättrige Traubenkraut (*Ambrosia artemisiifolia*) sowie der Eichenprozessionsspinner (*Thaumetopoea processionea*).

- Soziale Betroffenheit

Ärmere soziale Schichten sind – zum Teil bedingt durch die Lage ihrer Wohngebiete, mehr jedoch durch die bautechnische Beschaffenheit der Gebäude – dem Klimawandel gegenüber besonders exponiert. Als sehr sicher gilt, dass ärmere Bevölkerungsschichten somit eine bei weitem geringere Anpassungskapazität insbesondere gegenüber zunehmenden Hitzewellen haben. Oftmals sind schlecht isolierte Wohnungen ohne Klimatisierungen im Sommer überhitzt und Investitionen für effektive Klimatisierungen kaum finanzierbar. Die Abschwächung und Verkürzung der kalten Jahreszeit (weniger Heizgradtage) kann hingegen als ein Entlastungsfaktor angesichts steigender Energiepreise angenommen werden.

Ältere Bevölkerungsgruppen sind – zumal wenn sie allein leben – besonders empfindlich gegenüber Hitzewellen. Oftmals spielen hier Wohn- und Betreuungssituation zusammen mit Altersarmut. Alles zusammen führt mit einer erhöhten Disposition (vgl. Gesundheit) zu einer insgesamt sehr wahrscheinlich erhöhten Vulnerabilität Älterer.

Als sehr sicher kann zudem angenommen werden, dass der klimabedingte Migrationsdruck auf Österreich aus Entwicklungs- und Schwellenländern zunehmen wird. Ob sich dies auch in erhöhten Einwanderungszahlen niederschlagen wird, hängt von der politischen Gestaltung ab und ist insofern unsicher. Festgestellt werden muss in jedem Fall mit hoher Sicherheit, dass sowohl bei der globalen Lastenverteilung als auch bei der einkommensspezifischen Verteilung von Klimafolgen (insbesondere auch extremen Wetterereignissen und Witterungsperioden) eine Gerechtigkeitslücke zwischen den Problemverursachern (Hauptemittenten auf globaler und nationaler Ebene) und denjenigen besteht, die die Hauptfolgen des Klimawandels zu gegenwärtigen haben.

[1] Hutter et al., 2007
[2] Nach MunichRe NatCatService

- Ökonomische Dimension

Die ökonomischen Auswirkungen extremer Wetterereignisse in Österreich sind bereits jetzt erheblich und haben in den letzten drei Jahrzehnten zugenommen (sicher, Band 2, Kapitel 6). Die Schäden durch extreme Wettereignisse in Österreich betragen nach Datenauswertung der MunichRe-Schadensdatanbank für Österreich für die Periode 1980 bis 2010 insgesamt rund 9,3 Mrd. € (in Preisen von 2010), wobei die mittleren jährlichen Schäden von 97 Mio. in 1981 bis 1990 auf 706 Mio. € in 2001 bis 2010 zugenommen haben. Die Zunahme der Schäden ist sowohl auf häufigere witterungs- und klimabezogene Extremereignisse als auch auf eine höhere Exposition von Werten zurückzuführen. Insbesondere die Hochwasser 2002 (3,5 Mrd. €) und 2005 (0,6 Mrd. €) sowie mehrere starke Winterstürme mit Schäden von jeweils mehreren hundert Millionen € schlugen im letzten Jahrzehnt zu Buche. Bei diesen Schäden handelt es sich lediglich um die direkten Schadenskosten, die durch Wiederherstellung und Reparaturen anfielen. Indirekte Folgewirkungen sind hierbei nicht erfasst.

Die möglichen ökonomischen Auswirkungen des Klimawandels werden überwiegend durch Extremereignisse und extreme Witterungsperioden bestimmt (mittleres Vertrauen). Die in den letzten drei Jahrzehnten aufgetretenen Schadenskosten von Extremereignissen legen nahe, dass Veränderungen in der Frequenz und Intensität solcher Schadensereignisse signifikante Auswirkungen auf die Volkswirtschaft Österreichs hätten. Neben Extremereignissen führen auch graduelle Temperatur- und Niederschlagsänderungen zu ökonomischen Auswirkungen, z. B. in Form sich verändernder Ertragspotenziale in der Landwirtschaft oder in der Schneesicherheit von Skigebieten mit entsprechenden Auswirkungen auf den Wintertourismus.

Durch den Klimawandel und die derzeit absehbare sozioökonomische Entwicklung steigen die Schadenspotenziale für Österreich in der Zukunft (mittleres Vertrauen, Band 2, Kapitel 3). Eine Vielzahl an Faktoren determiniert die künftigen Kosten des Klimawandels: neben der möglichen Änderung in der Verteilung von Extremereignissen sowie graduellen Klimaänderungen sind es vor allem sozioökonomische und demografische Faktoren, die letztlich die Schadenskosten determinieren werden. Dazu gehören u. a. die Altersstruktur der Bevölkerung im urbanen Raum, die Werteexposition, der Infrastrukturausbau in z. B. durch Massenbewegungen gefährdeten Gebieten sowie allgemein die Landnutzung, die maßgeblich die Vulnerabilität gegenüber dem Klimawandel steuert.

- Tourismus

Der Wintertourismus in Österreich wird mit hoher Wahrscheinlichkeit von der winterlichen Erwärmung und der Verkürzung bzw. Unterbrechung der Saison durch geringere Schneesicherheit negativ betroffen sein. Somit steigt die Abhängigkeit von wasser- und energieintensiver künstlicher Beschneiung sehr sicher in ganz Österreich. Die Anzahl schneesicherer Skigebiete verringert sich nach Osten zu weiter und es ist damit zu rechnen, dass sich der Wintertourismus auf schneesichere bzw. mit künstlicher Beschneiung ausgestattete Gunstlagen konzentrieren wird.

Der Sommertourismus in Österreich kann von künftig vermehrt auftretenden Hitzesommern in Europa profitieren. Die Alpen dienen insofern mit hoher Wahrscheinlichkeit künftig als „Sommerfrische“ für von Hitzewellen geplagte Städter bzw. Mittel- und Südeuropäer.

Der Städtetourismus zeigt sich insgesamt dem Klimawandel gegenüber relativ robust. Auswirkungen sind insofern zu erwarten, als sich die Aktivitäten von Städtetouristen gegebenenfalls stärker auf städtische Grünflächen, Parks und Gastgärten konzentrieren werden und zumindest nicht klimatisierte Gebäude in den Sommermonaten eher meiden werden. Jahreszeitlich ist wahrscheinlich mit einer Verlagerung des Städtetourismus-Schwerpunktes weg vom Sommer hin zu den Übergangsjahreszeiten zu rechnen.

- Extremereignisse, Naturgefahren und Risikotransfer

Generell kann von einer Zunahme der Hochwasserschäden ausgegangen werden (wahrscheinlich), aufgrund der bestehenden Unsicherheiten der Klimamodelle bei Extremereignissen sind lokale Aussagen jedoch unsicher.

Eine generalisierte Aussage über veränderte Frequenz-Magnitude-Beziehungen in bestehenden Vermurungsgebieten ohne Permafrost ist nicht möglich. Es sind jedoch drei neue Prozessdimensionen zu erwarten (wahrscheinlich):

- neu entstehende Muranrissgebiete oder Verschiebung der Muranrissgebiete in höhere Lagen durch Verschieben der Permafrostuntergrenze,
- erhöhte oder neu entstehende Geschiebepotenziale in Umlagerungsstrecken (Geschiebe-Remobilisierung) durch permafrostbedingte Primärprozesse (Rutschungen, Fels- und Bergstürze, Hangmuren),
- neu entstehende Muranrissgebiete in bekannten Einzugsgebieten oder neue Prozessräume durch reduzierte Schutzfunktion des Waldes aufgrund erhöhter Vulnerabilität im Hinblick auf Trockenstress, Schädlingsbefall, Waldbrand, Sturm und Waldvitalität.

Aussagen zu klimawandelbedingten Veränderungen der Schäden durch Hagel, Sturm und Lawinen sind aus den derzeitigen Klimaprojektionen nicht ableitbar und somit unsicher.

- Bebauung und Raumplanung

Hinsichtlich des Heiz- und Kühlbedarfs von Gebäuden in Österreich führt der Klimawandel insgesamt zu einer Reduktion des Gesamtenergiebedarfs (sehr wahrscheinlich). Dabei wird die klimabedingte Einsparung von Heizenergie den zusätzlichen Energiebedarf zur Raumkühlung um ein Vielfaches übersteigen. Die Veränderung des Heizbedarfs wird in alpinen Räumen Westösterreichs deutlich höher ausfallen als in den östlichen Niederungen, wohingegen der Kühlbedarf in Niederösterreich, Wien, der Südoststeiermark und dem Südburgenland am stärksten steigen wird.

Klimawandelbedingter Wassermangel in Österreich kann ausgeschlossen werden (sicher). Für die bestehenden lokalen und regionalen Versorgungseinheiten in Ungunstlagen (geologische Gegebenheiten, geringe Pufferung und Vernetzung etc.) wird eine quantitative sowie qualitative Beeinträchtigung der Trinkwasserversorgung durch den Klimawandel allerdings nicht ausgeschlossen. Vor diesem Hintergrund wird vor allem der regionalen Vernetzung kleiner ländlicher Versorgungseinheiten eine in Zukunft steigende Bedeutung beigemessen.

Die Entwicklung des Siedlungsraums – und damit des Schadenspotentials – ist einer deutlich stärkeren Dynamik unterworfen als die Beeinflussung der Häufigkeit und/oder Intensität von Hochwassern durch den Klimawandel. Gerade deshalb ist es notwendig, mögliche klimawandelbedingte Änderungen der Hochwassergefährdung mit in die Planung einzubeziehen, um das Schadenpotenzial reduzieren zu können.

- Infrastruktur

Liniengebundene Verkehrsinfrastrukturen (Straßen und Bahnen) werden sehr wahrscheinlich von extremen Niederschlagsereignissen besonders betroffen. Mehr als drei Viertel aller Schäden entstehen durch mittelbare Folgewirkungen extremer Niederschläge (Muren, Rutschungen, Unterspülungen, Lawinen). Dies zeigt sich aus jüngsten Erhebungen aus existierenden Straßen- und Schienenschadensdatenbanken. Künftige Schadenspotenzialanalysen müssen sich – neben den unsicheren Projektionen für extreme Niederschläge – insbesondere mit Szenarien zum Infrastrukturausbau beschäftigen, die künftige Expositionen determinieren werden.

Die durchschnittlichen direkten jährlichen Schäden durch wetterbedingte Ereignisse im Bereich Verkehrsinfrastruktur belaufen sich – auf Basis unsicherer und unvollständiger Schadensdaten und hochgerechnet anhand von Daten aus vier Bundesländern (Steiermark, Salzburg, Tirol und Vorarlberg) – auf rund 50 Mio. €/Jahr. Die Schätzung direkter jährlicher Schäden im Bereich Energieinfrastrukturen ist anhand der vorliegenden Daten nicht möglich. Es ist sehr wahrscheinlich, dass die indirekten Folgekosten sowohl von Verkehrsunterbrechungen als auch von Unterbrechungen in der Stromversorgung in vielen Fällen weit höher sein werden, als die direkten Schadenskosten für die Instandsetzung der Infrastrukturen.

Energieinfrastrukturen zeigen ein komplexes Bild wetterbedingter Störungen. So sind gerade bei den Verteilernetzen niederschlagsinduzierte Ereignisse (analog zu den Verkehrsinfrastrukturen) wesentlich und führen zu direkten physischen Schäden. Andererseits spielen bei der Energieinfrastruktur auch z. B. durch die Nachfrage angetriebene Durchleitungsprobleme eine wesentliche Rolle. Dabei können vermehrte Hitzewellen zu besonderen Komplikationen führen, da während dieser sowohl in der Energieerzeugung Probleme auftauchen (Niedrigwasser und verminderte Kühlwasserzufuhr), als auch gerade die Durchleitungen von Strom in Richtung Italien besonders beansprucht sind (hoher Energiebedarf in Südeuropa und geringere Kraftwerksleistungen ebendort) und zugleich der Strombedarf in Österreich (Kühlenergie und Bewässerung) ebenfalls signifikant ist. Da hier allerdings derzeit nur wenige Daten vorliegen, sind diese Aussagen unsicher.

- Forschungsbedarf

Klimafolgen auf die Anthroposphäre werden häufig als Handlungsgrundlage und Rechtfertigung für Anpassungsmaßnahmen herangezogen. Dabei steht immer häufiger die politische Forderung nach einer möglichst monetären Bewertung von Klimafolgen im Raum.

Die Forschung muss sich demnach stärker mit den volkswirtschaftlichen Folgen des Klimawandels befassen, um politisch relevante Aussagen zu erarbeiten. Eine Monetarisierung von Klimafolgen und deren Folgeeffekten (oft „impact chains“ bzw. Klimafolgeketten genannt) erscheint den politisch Verantwortlichen wesentlich. Hier ist Forschungsbedarf gegeben, gerade weil die Folgen auf so komplexe Wirkungszusammenhänge – direkte wie indirekte, kurzfristige wie langfristige – zurückzuführen sind.

Monetär bewerten lassen sich nur diejenigen Klimafolgen, die marktbasierte Preise von Gütern und Dienstleistungen betreffen. Alles, was sich nicht oder nur mit fragwürdigen Methoden in € darstellen lässt, kann in ökonomischen Studien nicht oder nur qualitativ dargestellt werden. Dazu gehören wesentliche Dinge wie Gesundheitsfolgen, Ökosystemdienstleistungen wie Bodenfruchtbarkeit, Wasserbereitstellung etc. Wie

hier sinnvoll eine ökonomische Darstellung erfolgen kann, ist auch international Forschungsgegenstand.

Gleiches gilt für die so genannten indirekten Klimafolgen, also Folgeeffekte direkter physischer Klimafolgen bzw. von Extremereignisse, deren methodische Bewertung bislang noch unvollständig ist. Ebenso sind internationale Klimafolgen (etwa Ernteeinbrüche in anderen Weltregionen) selten ohne Rückkopplung auf Österreich, allerdings derzeit noch kaum sinnvoll ökonomisch bewertbar.

Zudem darf man sich von ökonomischen Darstellungen nicht erhoffen, dass sie räumlich explizite Werte liefern, wie sie für die Anpassungsplanung benötigt werden. Dies ist sowohl methodisch als auch hinsichtlich der benötigten Datengrundlage bislang kaum möglich.

Daher ist es wesentlich, Klimafolgenstudien weiterhin auch als Vulnerabilitätsdarstellungen abzuhandeln. Vulnerabilität lässt Rückschlüsse auf besonders anfällige Bevölkerungsschichten und Regionen zu und bietet somit eine wesentliche Grundlage für politisches Handeln hinsichtlich Anpassung.

Herausforderung für Politik und Forschung gleichermaßen muss es sein, anpassungsrelevante Klimafolgenforschung so auszurichten, dass sie entsprechend umsetzungsrelevante Ergebnisse liefert. Dafür müssen die konkreten Fragestellungen von Politik und Verwaltung klar formuliert werden.

Eine wesentliche Aufgabe künftiger Forschung muss es auch sein, Klimafolgestudien und Risikoabschätzungen stärker zusammen zu bringen, wenn möglich zu integrieren. Risikoabschätzungen sind eine wesentliche Planungsgrundlage in der Raumordnung und kleinräumigen Flächenwidmung. Die entsprechenden Instrumente, wie Risikozonierung und Flächenwidmung, müssen viel stärker Eingang in die Klimawandelanpassung finden bzw. müssen Klimafolgen in die entsprechenden Planungsinstrumente eingebracht werden. De facto sollten Naturgefahren, Risikozonierung und Klimawandelfolgen mehr und mehr gesamthaft betrachtet werden, denn was bei den meisten Klimafolgen für die Anthroposphäre im Zentrum steht, sind die (zunehmenden) Extremereignisse und weniger die allmählichen Klimaänderungen. Die Erarbeitung von Methoden, die zuverlässigere Aussagen zu Extremereignissen aus den Klimamodellen ermöglichen, bleibt eine wesentliche Anforderung der Klimafolgenforschung an die Klimamodellierung.

Nicht zu vergessen ist bei aller Zukunftsausrichtung klimawandelbezogener Forschung, dass in Österreich bereits heute gewaltige klimaindizierte Schäden beobachtet werden, die eines klarmachen: Die Darstellung der heutigen Klimafolgen und deren Kosten deutet auf ein massives Anpassungsdefizit hin und bildet bereits jetzt eine enorme Rechtfertigung, in Anpassungs- und Schutzmaßnahmen zu investieren. Allerdings besteht auch hier ein Forschungsauftrag: die konsistente Darstellung eines derzeitigen „Klimakostenstandes“ und die Formulierung an Politik und Verwaltung, welche Art der Schadenserfassung nötig ist, um diesen Stand bereitzustellen und zu beobachten.

6 Der Einfluss des Klimawandels auf die Anthroposphäre
6 Climate Change Impacts on the Anthroposphere

Das vorliegende Kapitel umfasst mit den sozioökonomischen Dimensionen des Klimawandels ein breites Feld an direkten und indirekten Auswirkungen und Wechselwirkungen von Klimaveränderungen. Diese betreffen soziale und gesundheitliche Aspekte der Bevölkerung ebenso, wie ökonomische Effekte, die durch Temperaturanstieg und Veränderung der Niederschlagscharakteristika sowie durch Veränderung der Stärke und der Häufigkeit von Extremereignissen und den sich daraus ergebenden Naturgefahren hervorgerufen werden.

Das Kapitel besteht aus sieben Unterkapiteln mit wechselseitigen Bezügen. Es beginnt mit direkten und indirekten Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die menschliche Gesundheit. Danach wird die soziale Betroffenheit betrachtet, also klimawandelbedingte Auswirkungen auf die Lebenssituation der Bevölkerung. Daran anschließend geht der Fokus hin zu den Auswirkungen auf die österreichische Volkswirtschaft. Die folgenden Abschnitte beschreiben die Auswirkungen des Klimawandels vor allem aufgrund von Extremereignissen sowie deren mittelbarer Wirkung auf Siedlungsstruktur, Bebauung sowie Infrastruktur.

Es sei an dieser Stelle klargestellt, dass die meisten der beschriebenen Auswirkungen des Klimawandels in Österreich insgesamt negativ sind. Das wird ersichtlich aus der Vulnerabilität der Bevölkerung hinsichtlich der beschriebenen Klimafolgen: unsere Gesellschaft ist gegenüber Hitze weitaus empfindlicher als gegenüber Kälte, die Tourismusbranche macht im Winter schneeabhängige Umsätze, die durch ein Plus im Sommertourismus kaum zu kompensieren sind, unsere Siedlungen und Infrastrukturen sind etwa gegenüber Massenbewegungen / mehr Starkniederschlägen im alpinen Terrain besonders anfällig, etc.

Demgegenüber stehen natürlich auch positive Folgen einer Erwärmung in Österreich. Diese eröffnen Möglichkeiten in verschiedenen Bereichen, wie etwa Sommertourismus und

Landwirtschaft. Allerdings müssen diese Chancen auch entsprechend genutzt werden und es ist noch nicht klar, wie weit sich diese Möglichkeiten auch erschließen lassen.

Manche der in diesem Kapitel beschriebenen Veränderungen sind mit relativ großen Unsicherheiten behaftet. Im Sinne der Vorsorge ist es jedoch unabdingbar, alle potenziellen und negativen Klimafolgen klar darzulegen, um entsprechende Anpassungsmaßnahmen treffen zu können, die insbesondere Gefährdungen für den Menschen und seine Umwelt verhindern und somit auch die Verletzung grundlegender Rechte (Überleben, Gesundheit, Autonomie) zu vermeiden suchen (vgl. Jonas, 1979).

6.1 Auswirkungen des Klimawandels auf die Gesundheit
6.1 Climate change impacts on health

Klimatische Bedingungen und deren Variabilität stehen mit der menschlichen Gesundheit in komplexen Wirkungszusammenhängen (z.B. Haines et al., 2006; WHO, 2009; McMichael, 2011). Es gibt eindeutige Hinweise darauf, dass der anthropogen verursachte Klimawandel weltweit bereits zu negativen Gesundheitseffekten geführt hat (Confalonieri et al., 2007; WHO, 2009). Trotz einiger potenziell positiver Auswirkungen wird davon ausgegangen, dass weltweit die negativen Auswirkungen überwiegen und sich in naher Zukunft unter fortschreitenden Klimaveränderungen verstärken werden (Confalonieri et al., 2007). Ärmere Weltregionen aber auch ärmere Bevölkerungsgruppen in Staaten mit mittlerem Einkommen werden auf Grund ihrer limitierten Anpassungskapazität vom Klimawandel am stärksten betroffen sein. Auch müssen wohlhabende Nationen wie Österreich mit ernsten Herausforderungen rechnen. Sie werden mit Gesundheitsproblemen, die die Lebensqualität beeinflussen, konfrontiert sein. Damit verbunden entstehen aber auch ökonomische Folgen, die durch steigende Gesundheitskosten und Verminderung der Arbeitsproduktivität entstehen (Ciscar et al., 2010a; siehe auch Haines et al., 2006; Confalonieri et al., 2007; Watkiss und Hunt, 2012). Zu den besonders verletzlichen Bevölkerungsgruppen zählen einkommensschwache, sozial schwache, ältere und chronisch kranke Menschen.

Als positive Auswirkungen auf die Gesundheit auf globaler Ebene prognostiziert der 4. IPCC-Assessment-Report eine Reduktion von Kältetoten (Confalonieri et al., 2007; vgl. Jendritzky, 2007). Direkte negative Effekte umfassen Temperatur-abhängige Morbidität und Mortalität sowie direkte Auswirkungen extremer Wetterereignisse (z.B. Hitzewellen, Dürreperioden, Starkniederschläge, Fluten, Stürme und tropische Zyklone außerhalb tropischer Gebiete; siehe Schubert et al., 2008). Zu den indirekten Effekten zählen klimasensitive, übertragbare Erkrankungen (über Vektoren, Nahrung und Wasser übertragbare Infektionskrankheiten), nicht-übertragbare Erkrankungen, wie Allergien oder Erkrankungen, die im Zusammenhang mit einer Erhöhung des bodennahen Ozons stehen (Confalonieri et al., 2007) oder durch Nahrungsmittel- und Wasserknappheit verursacht werden, aber auch psychische Probleme, die durch Naturkatastrophen (catastrophic events) ausgelöst werden (post-traumatische Belastungsstörungen, Stress; vgl. Kaiser und Binder, 2005; Ciscar et al., 2010a).

Die indirekten Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die menschliche Gesundheit, insbesondere die durch Arthropoden (und andere Vektoren) übertragenen Krankheitserreger, können möglicherweise zu einer besonders großen Herausforderung für das Gesundheitssystem werden, da eingeschleppte Infektionskrankheiten viel weniger vorhersehbar und die Möglichkeiten, Gegenmaßnahmen zu ergreifen, gering sind. Neue Krankheitserreger wandern ein oder werden eingeführt und können sich etablieren aber auch bereits vorhandene Krankheitserreger können sich regional weiter ausbreiten (oder auch verschwinden) (Rabitsch und Essl, 2010; Aspöck und Walochnik, 2010).

Abbildung 6.1 zeigt im Überblick die unterschiedlichen Wirkungspfade des Klimawandels auf die Gesundheit (Confalonieri et al., 2007; McMichael et al., 2004). Neben klimatischen Faktoren (Temperatur, Niederschlag, Wetterverhältnisse, stratosphärische Ozonabnahme) spielen für den Gesundheitszustand der Bevölkerung auch nicht klimatische Faktoren eine bedeutende Rolle (siehe Dahlgren und Whitehead, 1991): neben Alter, Geschlecht und genetischer Disposition gehören Lebens- und Arbeitsbedingungen, die Einbindung in soziale (Beziehungs- und Versorgungs-)Netze sowie individuelle Verhaltensweisen dazu.

Gesundheitseffekte (temperaturabhängige Morbidität und Mortalität), die im Zusammenhang mit niedrigen Umgebungstemperaturen (Kältestress) stehen, werden in der Literatur unter unterschiedlichen Aspekten und kontrovers diskutiert. Sie sind grundsätzlich schwieriger zu erfassen, denn die Mechanismen zwischen Kältestress und Mortalität sind weniger klar, als der Zusammenhang zwischen hohen Umgebungstemperaturen und Mortalität (Laschewski und Jendritzky, 2002; Jendritzky, 2007). Im Jahresgang zeigen sich in den gemäßigten Breiten maximale Mortalitätsraten im Winter (die höchsten Werte treten allerdings bei ausgeprägten Hitzeperioden auf; Jendritzky, 2007), die jedoch eher durch ein

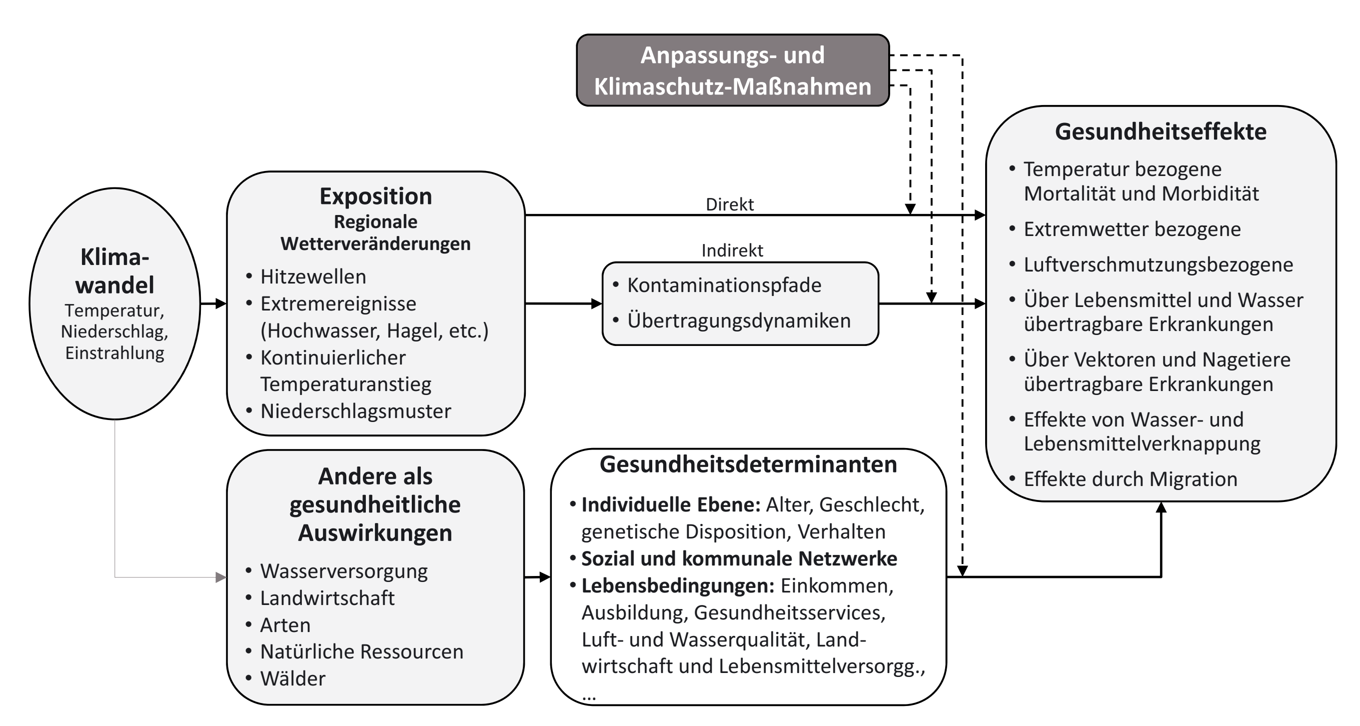


Abbildung 6.1 Direkte und indirekte Wirkungspfade des Klimawandels auf die Gesundheit. Adaptiert nach Confalonieri et al. (2007); McMichael et al. (2004)

Figure 6.1 Direct and indirect impact chains of climate change affecting health. Adapted from Confalonieri et al. (2007); McMichael et al. (2004)

prinzipiell höheres Infektionsrisiko in der kalten Jahreszeit erklärt werden können, als durch direkte Kälteeinwirkungen. Wie bereits erwähnt, wird global gesehen eine Reduktion von Kältetoten prognostiziert (Confalonieri et al., 2007; Ciscar et al., 2010a; vgl. dazu Jendritzky, 2007). Vereinzelte Kälteextreme („cold events"), wie sie auch in Zukunft erwartet werden (IPCC, 2013; IPCC, 2012), werden sich vor allem in jenen Ländern negativ auswirken, die nicht gut an Kälte angepasst sind. Allerdings zeigt sich auch ein Anstieg der Mortalitätsraten im Zuge von Kältewellen in an Kälte grundsätzlich gut angepassten Ländern, wenn Innenräume wegen unzuverlässiger Infrastruktur nicht entsprechend geheizt werden können (Confalonieri et al., 2007) oder wenn Energiekosten für arme Bevölkerungsgruppen nicht leistbar sind (siehe Lloyd, 2013). In diesem Kontext ist die steigende Anzahl an „Kältetoten" („cold deaths"), wie sie in einigen Europäischen Ländern, insbesondere in Großbritannien, beobachtet wird, zu verstehen (Confalonieri et al., 2007). Damit zählen diese – anders als die Bezeichnung „Kältetote" suggeriert – nicht zu den Gesundheitseffekten, die direkt durch Kälte hervorgerufen werden. Österreich ist wahrscheinlich auf Grund besserer Standards (Gebäudezustand und Beheizung) von dieser Art von „Kältetoten" bislang nicht betroffen. Es ist allerdings nicht auszuschließen, dass aufgrund verschärfter sozioökonomischer Rahmenbedingungen (und in Folge Zunahme von Armut) in Kombination mit steigenden Energiepreisen auch in Österreich ähnliche Problemen auftreten können.

Im Folgenden wird auf jene gesundheitsrelevanten Auswirkungen des Klimawandels eingegangen, die bislang für Österreich am besten untersucht wurden. Dabei handelt es sich um Mortalitätsraten durch Hitzewellen und kontinuierliche Temperaturerhöhung, als Beispiel für Temperatur-induzierte direkte Einflüsse, sowie um durch Vektoren und Nahrung übertragene Krankheitserreger. Allergien stellen ein Beispiel für klimasensitive nicht-übertragbare Erkrankungen dar. Weitere Aussagen zu den möglichen Gesundheitsfolgen von Klimaveränderungen hinsichtlich Prognosen zur Entwicklung einzelner Erkrankungen sind für Österreich weit schwieriger zu treffen: Dies gilt für den Einfluss verstärkter UV-Strahlung (z. B. auf die Entstehung von Melanomen; vgl. Holick, 2004; Moshammer et al., 2008; Simic, 2011) oder die Entwicklung und Auswirkungen von Ozon- und Feinstaubbelastung und deren Folgen (insbesondere für Kleinkinder und chronisch Lungenkranke).

6.1.1 Direkte Auswirkungen auf die Gesundheit

Die Auswirkungen von Temperaturerhöhung und insbesondere Hitzewellen[3] stellen wahrscheinlich die gravierendsten direkten Gesundheitseffekte der Klimaveränderungen dar (siehe EEA, 2012). Zahlreiche empirische Studien belegen den Zusammenhang zwischen Hitzeperioden oder auch kontinuierlicher Temperaturerhöhung im Sommer und erhöhten Mortalitätsraten (z. B. Menne und Ebi, 2006). Hitze belastet den menschlichen Organismus und kann vor allem bei einer schlechten gesundheitlichen Ausgangslage bis hin zum Tod führen (häufig durch Herzkreislaufversagen). Die Auswirkung thermischer Belastungen auf den Menschen hängt dabei stark von der individuellen Situation, wie dem allgemeinen Gesundheitszustand (bestehende Vorerkrankungen, Flüssigkeitsmangel, verminderte psychische und psychische Fitness), aber auch von der jeweiligen Wohn- und Betreuungssituation ab. zur besonders verletzlichen Bevölkerungsgruppe zählen daher ältere, chronisch kranke Personen, die allein leben (z. B. Hübler und Kleppner, 2007; Eis et al., 2010).

Europa erlebte innerhalb der letzten drei Jahrzehnte einige schwere Hitzewellen, die in Westeuropa zu etwa 19 Toten pro 10 000 Personen führten (Robine et al., 2008). Im „Jahrhundertsommer“ 2003 wurde in Österreich, sowie in ganz Europa (insbesondere in Westeuropa), eine erhöhte Mortalität (vor allem in der älteren Bevölkerung) beobachtet. Allein zwischen dem 3. und 16. August 2003 wurden 39 000 zusätzliche Sterbefälle in 12 Europäischen Ländern verzeichnet. Frankreich war mit einer Übersterblichkeitsrate von 95 % (in diesem Zeitraum) besonders betroffen (siehe Robine et al., 2008). Einer aktuellen Studie zu Folge könnte 2080 europaweit die hitzebedingte Mortalität (ohne physiologischer Akklimatisierung) je nach Szenario zwischen 60 000 und 165 000 Toten pro Jahr betragen (Ciscar et al., 2010a).[4] Österreich ist in dieser Studie unter der Region „Central Europe South“ subsummiert (siehe ebenda). Nach Watkiss und Hunt (2012) liegt Österreich europaweit bezüglich Hitzetoten pro 10 000 EinwohnerInnen für den Zeitraum 2071 bis 2100 im Mittelfeld Es ist zu betonen, dass durch entsprechende Anpassungsmaßnahmen diese Zahl drastisch reduziert werden könnte (Ciscar et al., 2010a).

Im Sommer 2003 kam es in Wien zu etwa 180 zusätzlichen durch Hitze bedingten Todesfällen (Hutter et al., 2007). Moshammer untersuchte mit jeweils unterschiedlichen Co-AutorInnen (Moshammer et al., 2006; Moshammer et al., 2009) hitzebedingte Mortalitätsraten zwischen 1990 und 2001 für Wien (2006) und für Oberösterreich (2009). Beide Studien verwendeten als Definition für Hitzewellen die sogenannten „Kyselý-Tage“: als Hitzeperiode wird nach Kyselý (2004) jene Periode definiert, in der an mindestens 3 Tagen die Maximaltemperatur von 30 °C überschritten wird, am Folgetagen das Tagesmaximum nicht unter 25 °C absinkt und das mittlere Temperaturmaximum der gesamten Periode nicht unter 30 °C sinkt.

An den insgesamt 206 Kyselý-Tagen der 15 Beobachtungsjahre wurde eine Zunahme der täglichen Todesfälle um 15,8 % für Wien beobachtet. Die Modellrechnung ergab eine Zunahme eine 7,8 %. Die Differenz zwischen berechneter und beobachteter Übersterblichkeit entspricht dem Effekt der kontinuierlichen Temperatursteigerung (siehe Moshammer et al., 2006). Während im Beobachtungszeitraum 1990 bis 2004 jährlich durchschnittlich 13,7 Kyselý-Tage zu beobachten waren, ergeben sich unter dem A1B-Szenario für den Zeitraum 2061 bis 2090 39,4 Kyselý-Tage. Mit den aus der Vergangenheit ermittelten Übersterblichkeitsraten schätzt die Studie 143 jährliche zusätzliche Sterbefälle an Kyselý-Tagen für den Zeitraum 2061 bis 2090. Wird der Effekt des kontinuierlichen Temperaturanstiegs in den Sommermonaten mitberücksichtigt, liegt die Schätzung bei 289 jährlichen Sterbefällen (Moshammer et al., 2006). Dies entspricht einer klimabedingten jährlichen Übersterblichkeit von 6 Todesfällen pro 10 000 EinwohnerInnen an Kyselý-Tagen und von 12 Todesfällen je 10 000 EinwohnerInnen für Kyselý-Tage und kontinuierlichen Temperaturanstieg.

Diese Beobachtungen für Wien stellen Muthers et al. (2010a, 2010b) in einen größeren zeitlichen Kontext (1970 bis 2007). An Hand des biometeorologischen Index PET (physiologically equivalent temperature) können auch sie einen klaren Zusammenhang zwischen Hitze und erhöhter Mortalität (Übersterblichkeit) nachweisen. Weiter zeigen ihre Ergebnisse eine signifikante Abnahme der hitzebedingten Mortalität für moderaten und für starken Hitzestress (Rückgang der Sensitivität) im Laufe der Untersuchungsperiode. Die AutorInnen sehen darin einen möglichen Hinweis auf langfristige Anpassungsprozesse (spontane Anpassung durch Einbau von Klimaanlagen und Verhaltensänderung) an veränderte klimatische Bedingungen. Bei geringem und extremem Hitzestress ist diese Abnahme nicht signifikant.

Derzeit wird in Deutschland von einer hitzebedingten Mortalität von jährlich rund 5 000 Personen ausgegangen. Die Zunahme der Hitzetage lässt für 2071 bis 2100 unter der Annahme gleicher Bevölkerungszahl und gleicher Altersstruktur

[3] Für Hitzewellen gibt es international unterschiedliche Definitionen.

[4] Für methodische Details siehe Ciscar et al. (2010b), Watkiss und Hunt (2012).

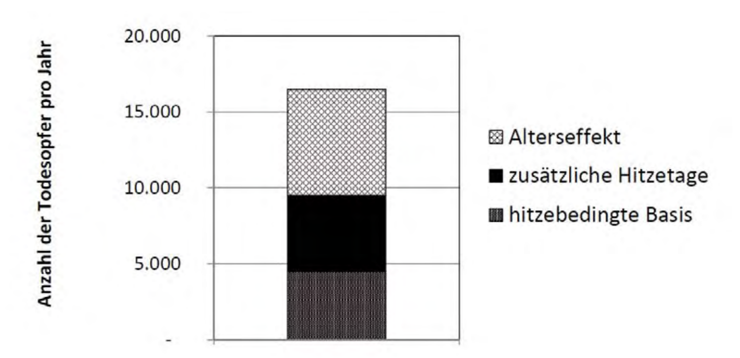


Abbildung 6.2 Anzahl der gesamten hitzebedingten Todesopfer pro Jahr im Prognosezeitraum 2071–2100 für Deutschland (exponentielle Extrapolation bei extremer Hitzebelastung). Quelle: Hübler und Kleppner (2007)

Figure 6.2 Number of heat-related Deaths per year during the projected period 2071–2100 for Germany (exponential extrapolation for extreme heat exposure). Source: Hübler und Kleppner (2007)

etwa eine Verdopplung erwarten (siehe Abbildung 6.2) (Hübler und Kleppner, 2007).

Derartige Schätzungen liegen für Österreich bislang noch nicht vor. Werden die Schätzungen für Deutschland ohne Berücksichtigung weiterer empirischer Daten, also sehr vereinfacht, auf Österreichs Bevölkerung übertragen (bei einer um den Faktor 10 kleineren Bevölkerungszahl), würde dies eine erhöhte hitzebedingte Mortalität von ca. 500 (ohne demographische Veränderungen) bzw. bis 2 200 (mit demographischen Veränderungen) zusätzlichen Todesfällen pro Jahr für den Zeitraum 2071 bis 2100 bedeuten. Diese Zahlen geben nur einen sehr groben Eindruck der Größenordnung wieder. Eine zurzeit laufende Studie, die im Rahmen des Austrian Climate Research Program (ACRP) durchgeführt und erst nach Erscheinung diese Berichts fertiggestellt wird, wird dazu spezifischere Szenario-basierte Abschätzungen liefern.

6.1.2 Indirekte Auswirkungen auf die Gesundheit

Klimatische Veränderungen bedingen eine Veränderung von Ökosystemen und wirken dadurch auch indirekt auf die menschliche Gesundheit ein. Manche Arten finden bessere Bedingungen vor und breiten sich aus, andere dagegen kommen mit den veränderten Bedingungen schlechter zurecht und ziehen sich zurück oder sterben aus. Dadurch fallen für wiederum andere Arten Räuber- oder Beuteorganismen oder auch Konkurrenten weg, und es kommt zu einer generellen Verschiebung der Artenzusammensetzung (Pflanzen, Tiere, Pilze, Mikroorganismen). So beeinflussen klimatische Veränderungen die Verbreitung zahlreicher Reservoirtiere und damit die Verbreitung aller Infektionskrankheiten mit einem tierischen Erregerreservoir (Zoonosen). Arthropoden (Gliederfüßer, z. B. Insekten oder Spinnentiere, wie Zecken) sind derartige ektotherme Organismen, die in ihrer Körpertemperatur, Aktivität und Verbreitung vollständig und direkt von den klimatischen Bedingungen ihrer Umwelt abhängig sind.

Nicht zuletzt unterliegt auch die Verbreitung allergener Pflanzen und Pilze den klimatischen Gegebenheiten. Darüber hinaus werden (durch das ja bereits alte, aber in den vergangenen Jahren verstärkte Phänomen der Globalisierung von Handel und Tourismus) zunehmend und meist unabsichtlich neue Arten (Neobiota) nach Mitteleuropa eingeschleppt (Rabitsch und Essl, 2010; Aspöck und Walochnik, 2010). Wenn diese durch den Klimawandel nun geeignete Bedingungen vorfinden, können sie sich mitunter auch etablieren. Dadurch können vormals nicht heimische (z. B. tropische) Infektionskrankheiten oder bisher unbekannte Allergien auftreten und das Gesundheitssystem vor neue Aufgaben stellen.

Klima-sensitive übertragbare Krankheiten

Wir unterscheiden zwischen endogener und exogener und bei letzterer zwischen direkter und indirekter Infektion. Bei der endogenen Infektion (Autoinfektion) stammt der Erreger aus der körpereigenen, normalerweise harmlosen Flora und gelangt bei geschwächtem Immunsystem z. B. über Haut, Lunge oder Darm in den Blutkreislauf. Bei der exogenen Infektion stammt der Erreger aus der Umgebung (Tröpfcheninfektion, Kontaktinfektion). Bei der direkten Infektion erfolgt die Erregerübertragung von Mensch zu Mensch ohne Zwischenschritte. Bei der indirekten Infektion erfolgt die Übertragung über externe Krankheitsüberträger. Diese sogenannten Vektoren (lat. *vector* „Reisender“, „Träger“) transportieren / übertragen dabei einen Erreger von einem auf einen anderen Organismus ohne selbst zu erkranken. Klimaänderungen spielen für die Epidemiologie von Infektionskrankheiten eine zentrale Rolle und zwar besonders für die Verbreitung von Vektor-übertragenen Infektionskrankheiten, weil fast alle Vektoren ektotherme Organismen[5] sind und – vor allem – weil der Mensch auf die

[5] D. h. Organismen wie etwa Zecken und Mücken, die z. B. durch Blutsaugen Krankheiten von außen an den Menschen herantragen und ihrerseits hinsichtlich ihrer Ausbreitung bzw. Etablierung von Klimabedingungen abhängig sind.

Ausbreitung von Vektoren nur sehr bedingt Einfluss nehmen kann (Aspöck, 2007).

Durch Vektoren übertragene Erreger

Zecken als Vektoren

Zecken sind die wichtigsten Überträger von Krankheitserregern in Mitteleuropa. In Österreich kommen zwei Zeckenfamilien vor, die *Ixodidae* (Schildzecken) und die *Argasidae* (Lederzecken) mit insgesamt über 40 Arten. Von diesen ist *Ixodes ricinus*, der gemeine Holzbock, nicht nur die häufigste Zeckenart, sondern auch der wichtigste Vektor.

Insgesamt können in Österreich fast 50 verschiedene Erreger von Zecken übertragen werden, neben mehreren Viren (z. B. FSME) auch eine Reihe von Bakterien (z. B. Borrelien, Rickettsien) und zumindest eine Gruppe von Protozoen (Babesien). Ein Großteil der österreichischen Populationen des gemeinen Holzbocks trägt zumindest einen potenziellen Krankheitserreger in sich, ein Drittel beherbergt sogar mehrere Erreger gleichzeitig (Blaschitz et al., 2008a, b, c). Der Holzbock ist nicht wirtsspezifisch, insbesondere die Blutmahlzeit an Vögeln spielt für die Verbreitung von Krankheitserregern eine wichtige Rolle, da Zugvögel Erreger aus anderen Regionen mitbringen, und diese dann durch den Zeckenstich auf den Menschen übertragen werden können. Aber auch Kleinnager, die wichtigsten Blutwirte der Zeckenlarven, spielen eine entscheidende Rolle, da sie zahlreiche Krankheitserreger beherbergen können und da Nagerpopulationen massiv von Klimaänderungen beeinflusst werden (Stark et al., 2009).

Durch eine Erhöhung der Jahresdurchschnittstemperatur kann es nicht nur zu einem Einwandern der Zecken in höher gelegene Gebiete kommen, sondern auch zu einer früher einsetzenden bzw. verlängerten aktiven Periode dieser Vektoren (Holzmann et al., 2009). Außerdem führt die Klimaerwärmung zu einer schnelleren Entwicklung sowohl der Zecken, als auch der von ihnen getragenen Erreger und schließlich auch zu einer größeren Verbreitung der Reservoirwirte. Hinzu kommt, dass Zecken-Arten, deren Hauptverbreitungsgebiet im Mittelmeerraum liegt, sich im Gefolge einer Klimaerwärmung nach Norden ausbreiten können. Sie fungieren als Überträger von Rickettsien (die mit Antibiotika gut zu behandeln sind), jedoch auch von Arboviren. Besonders muss das Virus des Krim-Kongo-Hämorrhagischen Fiebers (CCHF) erwähnt werden, das auf der Balkanhalbinsel vorkommt. Im Falle einer Infektion beträgt die Letalität 30 bis 60 % (es gibt bis heute keinen Impfstoff).

Stechmücken als Vektoren

In Mitteleuropa existieren etwa 50 Stechmücken-Arten (Familie *Culicidae*), von denen die meisten auch in Österreich vorkommen und auch am Menschen Blut saugen. Neben den Erregern der Malaria und einer Reihe von Fadenwürmern können Stechmücken weltweit viele verschiedene Viren übertragen. In Mitteleuropa zirkulieren derzeit (zeitlich und regional unterschiedlich) vor allem Sindbis-, Tahyna-, Usutu- und West-Nil-Viren. West-Nil-, Usutu- und Sindbis-Viren werden vermutlich regelmäßig durch Zugvögel nach Mitteleuropa eingeschleppt, es ist jedoch bekannt, dass sie in etablierten Zyklen auch den Winter in Mitteleuropa überleben können (Brugger und Rubel, 2009; Dobler und Aspöck, 2010a; Weissenböck et al., 2010).

Heute werden durch die rege Reisetätigkeit der Bevölkerung und durch die Globalisierung immer wieder tropische Viren nach Mitteleuropa importiert, von denen sich manche, sofern ein geeigneter Vektor vorhanden ist, zumindest zeitweise etablieren könnten.

Zumindest drei Stechmücken-Arten sind in den vergangenen Jahren als Neobiota nach Mitteleuropa eingeschleppt worden: *Aedes (Stegomyia) albopictus* (die Asiatische Tigermücke, vgl. Abbildung 6.3), *Ochlerotatus (Finlaya) japonicus* (die Asiatische Buschmücke) und *Ochlerotatus (Ochlerotatus) atropalpus* (eine nordamerikanische Art). Alle drei legen ihre Eier an den Rand kleiner Wasseransammlungen (z. B. in Autoreifen) ab und können so leicht über Kontinente hinweg verschleppt werden. Außerdem können alle drei als sehr effiziente Vektoren von mehreren (und zum Teil gefährlichen) Viren fungieren. Eine weitere Stechmücke, die immer wieder nach Europa eingeschleppt wird, ist *Aedes (Stegomyia) aegypti*,



Abbildung 6.3 Asiatische Tigermücke (*Aedes (Stegomyia) albopictus*). Foto: R. Pospischil

Figure 6.3 Asian tiger mosquito (*Aedes (Stegomyia) albopictus*). Picture: R. Pospischil

die Gelbfiebermücke. Auch diese könnte sich in den nächsten Jahren und Jahrzehnten in Mitteleuropa etablieren (Schaffner et al., 2012).

Die Übertragung der Malaria steht mit Klimafaktoren wie Temperatur und Niederschlag in komplexem Zusammenhang. Die Malaria (die Erreger gehören zur Gattung *Plasmodium*), wurde in Europa in den 1970er Jahren ausgerottet. Allerdings werden die Malaria-Erreger immer wieder (vor allem mit infizierten Reisenden, aber auch mit infizierten Anopheles-Mücken) nach Europa eingeschleppt und bisweilen kommt es auch zu einer kurzfristigen Zirkulation in heimischen Mücken. Veränderungen von Klimafaktoren können zwar eine autochthone Transmission begünstigen, andere Faktoren (wie sozioökonomische Rahmenbedingungen, Gebäudestandards, Kapazitäten der Gesundheitssysteme, Behandlungsmöglichkeiten) begrenzen allerdings ein klimawandelbedingtes Wiederauftreten der Malaria in Europa (Semenza und Menne, 2009; ECDC, 2010). Klimawandelbedingte autochthone Malariaausbrüche in Europa gelten als unwahrscheinlich (Kuhn et al., 2003, Semenza und Menne, 2009).

Sandmücken als Vektoren

Bei den Sandmücken (*Phlebotominae*) handelt es sich um eine Unterfamilie der Schmetterlingsmücken (*Psychodidae*). Etwa 70 Arten der Gattungen *Phlebotomus* und *Lutzomyia* können als Überträger von Leishmanien, den Erregern der Leishmaniosen, fungieren. Darüber hinaus gelten zahlreiche *Phlebotomus*-Arten als Überträger der sogenannten Phleboviren, welche grippeartige Erkrankungen auslösen können.

In Europa wurden bisher 22 Arten der Gattungen *Phlebotomus* und *Sergentomyia* nachgewiesen. Der Verbreitungsschwerpunkt liegt im Mittelmeerraum. Arten mit potenzieller Ausbreitung nach bzw. in Mitteleuropa sind: *Phlebotomus neglectus*, *P. perfiliewi*, *P. perniciosus*, *P. papatasi, P. sergenti*, *P. mascittii* und *Sergentomyia minuta*. In einer klimatologischen Untersuchung konnte gezeigt werden, dass auch in Österreich, zumindest in überdurchschnittlich warmen Jahren, geeignete Bedingungen für die Etablierung von *P. mascittii* und *P. neglectus* bestehen (Aspöck et al., 2008). Tatsächlich wurde *P. mascittii* im Jahr 2009 erstmals in Österreich nachgewiesen (Naucke et al., 2011). Durch die Klimaerwärmung können sich diese Populationen vergrößern und wieder ausbreiten bzw. haben sich bereits ausgebreitet (Aspöck, 2010). Dazu benötigen die Sandmücken eine Monatsdurchschnittstemperatur in den Sommermonaten von zumindest 20 °C (Fischer et al., 2010).

Leishmanien-Infektionen (Leishmaniosen) sind vor allem in den Tropen und Subtropen endemisch, kommen aber auch im Mittelmeerraum vor. Man unterscheidet die Haut-Leishmaniosen und die viszerale Leishmaniose (VL), wobei jeweils verschiedene Leishmanien als Erreger fungieren können (Walochnik und Aspöck, 2010). Eine HIV-Infektion erhöht dabei das Risiko einer Leishmanien-Infektion drastisch. Über, teilweise illegale, Hundetransporte aus verschiedenen Mittelmeerländern wurde in den vergangenen Jahren in Mitteleuropa und auch in Österreich ein erhebliches Leishmanien-Reservoir geschaffen (Leschnik et al., 2008). Wie jüngste Untersuchungen zeigten, werden auch durch den Menschen häufiger Leishmanien nach Österreich importiert (Poeppl et al., 2012, 2013). Durch das natürliche Vorkommen von Sandmücken in Mitteleuropa muss auch eine autochthone Übertragung von Leishmanien als möglich angesehen werden (Aspöck und Walochnik, 2009). Die Vektorkompetenz von *P. perniciosus* ist bekannt, jene von *P. mascittii* ist nach wie vor nicht eindeutig belegt. Tatsächlich sind aber mittlerweile autochthone Leishmaniose-Fälle aus Deutschland bekannt (Bogdan et al., 2001) und in Österreich gab es immerhin einige Verdachtsfälle (Kollaritsch et al., 1989).

Die Phleboviren gehören zur Familie der *Bunyaviridae*. In Europa kommen das Naples-, das Toscana-, das Sicily- und das Massilia-Virus vor (Depaquit et al., 2010). Als Vektoren spielen *P. papatasi*, *P. perniociosus*, *P. perfiliewi* und *P. neglectus* eine Rolle. Das Sicily- und das Naples-Virus sind die Erreger des Dreitage- oder Pappataci-Fiebers, welches mit grippeartigen Symptomen einhergeht. Das Verbreitungsgebiet dieser Viren umfasst den gesamten Mittelmeerraum. Das Toscana-Virus wird in erster Linie von *P. perniciosus* und *P. perfiliewi* übertragen, Infektionen mit dem Toscana-Virus verlaufen oft asymptomatisch, können aber auch zu einer akuten Gehirnhautentzündung führen. Auch das Toscana-Virus kommt vor allem im Mittelmeerraum vor, 2010 wurde es erstmals in Süddeutschland (Baden-Württemberg) nachgewiesen (Dobler und Aspöck, 2010b).

Zoonosen (Reservoirtiere)

Nagerpopulationen sind ausgesprochen anfällig für klimatische Veränderungen – und Nager fungieren für zahlreiche Krankheitserreger als Reservoirwirte. Hierzu zählen nicht nur das bereits genannte FSME-Virus, sondern z. B. auch die Borrelien, der Erreger der Pest (*Yersinia pestis*) oder die Hantaviren.

Aktiv eindringende Erreger

Die Näglerien sind 10–20 µm große Einzeller, die einzig bekannte pathogene Art ist *Naegleria fowleri*, welche beim Men-

schen die Primäre Amöben-Meningoenzephalitis (PAME) verursacht, eine akute Entzündung des Gehirns, die meist innerhalb weniger Tage zum Tod führt. Die Infektion erfolgt, wenn beim Baden kontaminiertes Wasser in die Nase gelangt. *N. fowleri* ist thermophil und kommt vor allem in warmen Gewässern, wie Schwimmbädern und Badeteichen, vor. Die Infektion tritt vor allem bei Kindern auf, was vermutlich auf deren Badeverhalten zurückzuführen ist. PAME-Fälle sind in Mitteleuropa lediglich in der ehemaligen Tschechoslowakei dokumentiert worden, wo in den 1960er Jahren 16 Kinder daran starben (Černa und Novak, 1968). In Italien trat 2003 der erste Fall auf, vermutlich bedingt durch den warmen Sommer mit ungewöhnlich hohen Temperaturen in Freilandgewässern (Cogo et al., 2004). Aus Österreich ist bisher noch kein Fall einer *N. fowleri*-Infektion bekannt.

Hakenwürmer (*Ancylostoma duodenale* und *Necator americanus*) gehören zu den Fadenwürmern. Deren ganzjährige Etablierung ist in Mitteleuropa nur dort möglich, wo der Boden im Winter nicht friert. In den Sommermonaten ist eine Übertragung generell möglich und es werden auch jedes Jahr Hakenwürmer nach Mitteleuropa also auch nach Österreich importiert.

Auch die Dirofilarien gehören zu den Fadenwürmern und verursachen beim Hund die sogenannte Herzwurmkrankheit. Sie werden als Larven von verschiedenen Stechmücken (Aedes-, Anopheles,- und Culex-Arten) übertragen. Beim Menschen kriechen sie meist als präadulte Würmer durch das Unterhaut-Bindegewebe, aber mitunter auch ins Auge oder die Lunge, wo sie erheblichen Schaden anrichten können. Dirofilariosen sind mit den Arten *Dirofilaria immitis* und *D. repens* in den Mittelmeerländern endemisch. In den letzten Jahren traten aber vermehrt auch Fälle autochthoner Dirofilariose in Mittel- und Osteuropa auf. In Österreich wurde 2008 der erste Fall beim Menschen beschrieben und zwar bei einer Person, die Österreich nie verlassen hatte (Auer und Susani, 2008).

Durch Lebensmittel und Wasser übertragene Erreger

Humanpathogene Mikroorganismen, die durch Lebensmittel und Trinkwasser übertragen werden, führen weltweit immer wieder zu großen Epidemien, oft mit vielen tausend Krankheitsfällen. Viele dieser Erreger erhöhen ihre Wachstumsraten bei steigender Umgebungstemperatur (siehe ECDC, 2013; Kornschober et al., 2009; Kovats et al., 2004, 2005). In Europa sind hier vor allem Salmonellen und Campylobacter als bakterielle Erreger sowie die Giardien und Kryptosporidien als protozoische Erreger zu nennen. Während die Korrelation der Inzidenzraten von Salmonelleninfektionen und steigender Temperatur – mit Spitzen in den Sommermonaten – nachgewiesen wurde (Kovats et al., 2004), sind diese Zusammenhänge bei Campylobacter noch unklar (Kovats et al., 2005).

Hauptursachen für die Transmission von Erkrankungen, die durch Lebensmittel übertragen werden (z. B. Salmonelleninfektionen), liegen im fehlerhaften Umgang bei Lagerung (Kühlung) und Zubereitung. Als bedeutende nicht-klimatisch bedingte Faktoren werden veränderte Essgewohnheiten (z. B. Grillen im Freien) und vermehrte Außenaktivitäten in der warmen Jahreszeit angesehen, die das Risiko erhöhen, mit pathogenen Mikroorganismen in Kontakt zu kommen (Kovats et al., 2004). Zusätzlich können Starkniederschläge zu Kontamination von Wasser und landwirtschaftlichen Produkten führen. Infektionsraten dieser klima-sensitiven Erkrankungen sind daher von nicht-klimatischen Faktoren, wie hygienischen Bedingungen, Präventionsprogrammen, gesetzlichen Bestimmungen, Information der Bevölkerung und Verhaltensmustern abhängig.

Kovats et al. (2004) untersuchten die Beziehung zwischen Umgebungstemperatur und Anzahl berichteter Salmonellenfälle in zehn europäischen Ländern. Dies war die epidemiologische Grundlage für eine Studie zur Abschätzung der klimawandelinduzierten Zunahme von Salmonelleninfektionen in Europa (EU 27) (Watkiss und Hunt, 2012). Die Ergebnisse zeigen eine temperaturbedingte (klimawandelinduzierte) jährliche Steigerung von durchschnittlich ca. 90 000 Fällen für die Periode bis 2020 (mit nur geringen Unterschieden zwischen den beiden betrachteten Klimaszenarien). Für den Zeitraum 2071 bis 2100 ergeben die Schätzungen eine bis zu 50 % Steigerung an Fällen, die allein durch Klimaveränderungen bedingt sind (40 000–120 000). Allerdings sind diese Ergebnisse auf Grund von Unsicherheiten und methodischen Problemen limitiert. Zudem ist es wahrscheinlich, dass bereits eingeführte, effektive Kontroll- und Präventionsprogramme, die in Österreich innerhalb einer Dekade die Anzahl der Salmonellenfälle um über 50 % reduzierten (siehe Schaffner et al., 2012), zu einer weiteren Abnahme führen werden. Klimaveränderungen könnten diesen Trend abschwächen.

Klimasensitive nicht-übertragbare Krankheiten

Allergien

Zahlreiche Pflanzen, Pilze aber auch Arthropoden können beim Menschen (z. B. durch Pollen, Sporen, Haare), durch Einat-

men, orale Aufnahme aber mitunter auch durch Hautkontakt, Allergien auslösen. Ein Anstieg der Jahresmitteltemperatur führt bei den meisten Pflanzen zu einer verlängerten Vegetationsperiode und stärkerem Wachstum bzw. bei Tieren zu einer verlängerten Aktivitäts- und Reproduktionszeit. Dadurch werden Betroffene bereits früher im Jahr und insgesamt unter Umständen länger und in stärkerem Ausmaß mit Belastungen rechnen müssen. Ebenso führen klimatische Veränderungen dazu, dass sich neue Arten in Österreich ansiedeln (Neobiota) bzw. sich bereits heimische Arten weiter ausbreiten, oder auch verschwinden. Unter den invasiven allergenen Neophyten ist *Ambrosia artemisiifolia*, das beifußblättrige Traubenkraut, zu nennen. Seine Pollen sind hochallergen, 4–5 % der EuropäerInnen sind bereits sensibilisiert (Richter et al., 2013), eine Entwicklung, die sich in Zukunft – ohne Anpassungsmaßnahmen noch verstärken wird. Richter et al. simulierten in ihrer kürzlich veröffentlichen Studie die zukünftige Ausbreitung der Pflanze in Österreich und Bayern, um die daraus entstehenden Allergiekosten abzuschätzen. Dabei legten sie ihren Berechnungen drei Klimaszenarien zugrunde (keine Änderung, moderate und extremere Änderung, d. h. 0,04 °C pro Jahr). Demnach werden sich die „Allergiekosten“ (Behandlungskosten), die durch eine klimainduzierte Ausbreitung von *Ambrosia* verursacht werden, zwischen 290 und 365 Millionen € jährlich belaufen (im Durchschnitt bis zum Jahr 2050, für das extremste Szenarium). Die AutorInnen betonen, dass dies die jährlichen Kosten für entsprechende Anpassungsmaßnahmen ungefähr um den Faktor 10 übersteigt (Richter et al., 2013).

6.2 Auswirkungen des Klimawandels auf die soziale Betroffenheit

6.2 Climate change impacts on social concerns

Die gesundheitliche Betroffenheit ist mit sozialen Gegebenheiten eng verknüpft. Sozioökonomische Rahmenbedingungen stellen einen bedeutenden Einflussfaktor auf den Gesundheitszustand dar – so haben sie Einfluss auf z. B. die Ernährungsweise, die Umweltqualität der Wohnumgebung und Wohnqualität, etc. Der Klimawandel hat hier unmittelbaren Einfluss. Meist treffen verschiedene Faktoren (niedriges Einkommen, geringer Bildungsgrad, wenig Sozialkapital, prekäre Arbeits- und Wohnverhältnisse, Arbeitslosigkeit, eingeschränkte Handlungsspielräume) zusammen, welche weniger privilegierte Bevölkerungsgruppen besonders verwundbar für Folgen des Klimawandels machen.(Kupfner, 2011). Bei der Betroffenheit unterschiedlicher sozialer Gruppen vom Klimawandel ist zunächst nach den verschiedenen Ursachen zu unterscheiden (Prettenthaler et al., 2008a):

- Unterschiedliche Betroffenheit durch Klimarisiken (Exposition und Sensitivität)
- Unterschiedliche Anpassungsfähigkeit auf geänderte Klimaverhältnisse
- Unterschiedliche Betroffenheit von klimapolitischen Maßnahmen

6.2.1 Soziale Betroffenheit durch Temperatureffekte

Klimawandelbezogene Wirkungen auf die Bevölkerung (unter Ausschluss der Gesundheitsaspekte – vgl. dazu Abschnitt 6.1) sind im günstigen Fall ein geringerer Heizbedarf durch wärmere und kürzere Winter, andererseits jedoch auch ein höherer Kühlbedarf bzw., wenn auf Kühlung verzichtet wird, Komforteinbußen durch extremere Hitzeperioden im Sommer.

Hitzebedingte Komforteinbußen betreffen einkommensschwache Bevölkerungsschichten in größerem Ausmaß. Sie wohnen in weniger attraktiven Quartieren und dort in Häusern bzw. Wohnungen, die nicht ohne Grund billiger sind. Die Lagen sind im Hinblick auf die klimatischen Gegebenheiten bereits heute ungünstiger und werden bei weiterer Klimaerwärmung noch weniger Komfort bieten: sie verfügen meist über weniger Grünraum, der zur Abkühlung und Ventilation beiträgt; sie zeigen mehr Bodenversiegelung und dichtere Bebauung, die in Städten zu Hitzeinsel-Effekten führt und weiters sind Grünräume oder Erholungsgebiete oft schlechter erreichbar. Die von weniger privilegierten Bevölkerungsgruppen bewohnten Gebäude haben oftmals auch eine schlechtere Bausubstanz (schlecht gedämmte, schlechter belüftete bzw. klimatisierte Objekte) oder befinden sich innerhalb der Häuser in ungünstigeren Lagen als teurere Objekte (z. B. Gangküchen ohne Querlüftungsmöglichkeit) und werden auch künftig vielfach keine Klimatisierung aufweisen. (Reiterer, 2006)

Jene einkommensschwachen Haushalte, die mehr als 10 % ihres Einkommens für Heizung aufwenden müssen, werden davon am stärksten betroffen sein, da sie künftig noch weniger in der Lage sein werden, auch Kühlung zu finanzieren, selbst wenn der Heizbedarf und damit die Heizkosten – in gewissem Ausmaß – zurück gehen werden. Auch deshalb, weil die betroffenen Haushalte oft noch energetisch ineffiziente Elektrogeräten und Heizungen besitzen, diese nicht ersetzen können und damit vergleichsweise höhere Energiekosten haben (vgl. Brunner et al., 2012). Von 2009 bis 2010 ist der Anteil der ÖsterreicherInnen, welche angegeben hatten, ihre Wohnung

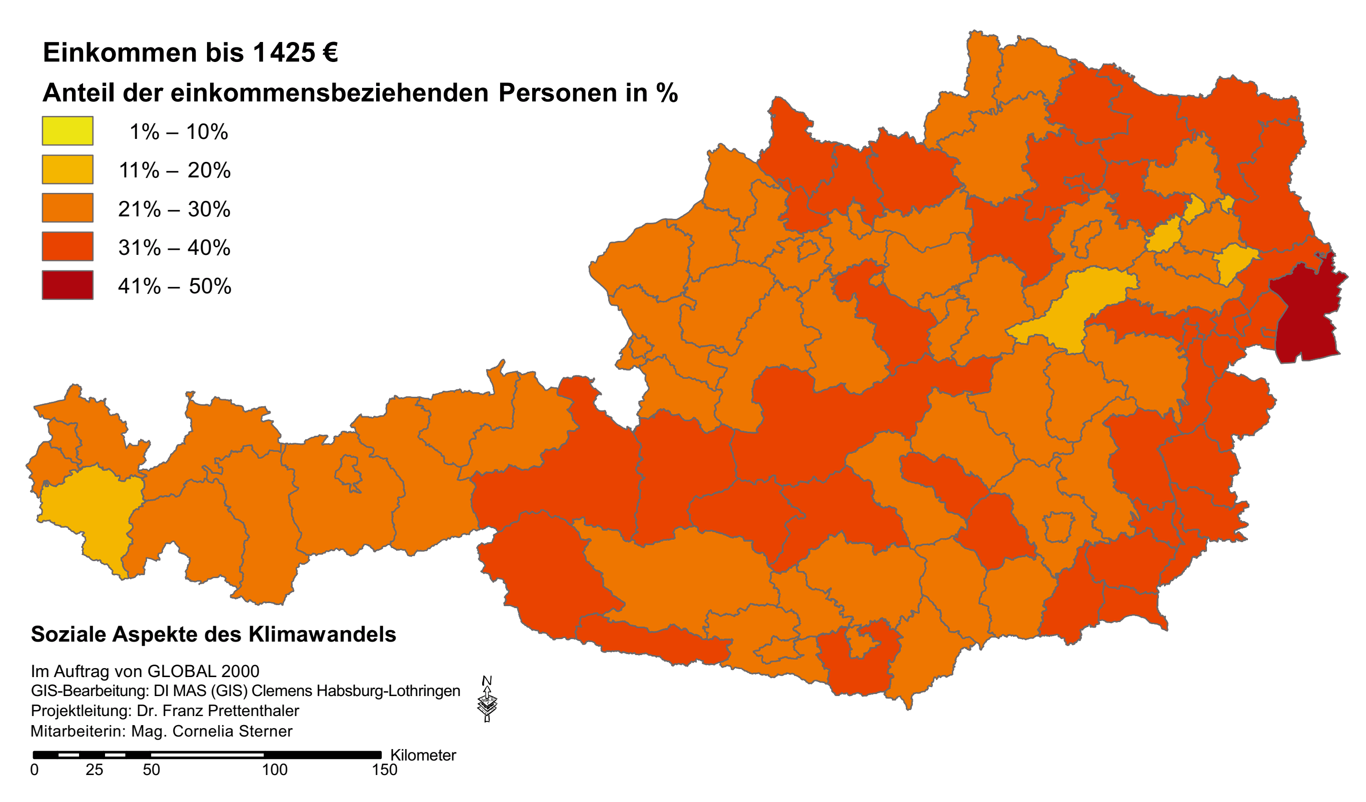


Abbildung 6.4 Räumliche Verteilung der Bevölkerungsschichten mit den geringsten Einkommen 2007 (unterstes Einkommensquartil < 1 425 €). Quelle: Prettenthaler et al. (2008a)

Figure 6.4 Spatial distribution of population with lowest income in 2007. Source: Prettenthaler et al. (2008a)

nicht angemessen heizen zu können, um fast ein Drittel gestiegen (Glaser, 2011). Abbildung 6.4 zeigt die räumliche Verteilung der Bevölkerung mit Einkommen im untersten Viertel (Monatseinkommen unter 1 425 €) – also jene einkommensschwachen Schichten, die vom Klimawandel stärker betroffen sein werden. Die angesprochene Bevölkerungsgruppe zeigt in der Ostregion – jener Region mit dem höchsten Temperaturanstieg in der heißen Jahreszeit und mit der größten Zunahme der Sommertage – die höchsten Anteile: nur 20–30 % in Wien, sowie den politischen Bezirken Mödling, Baden und Korneuburg, jedoch 31–40 % in den ländlicheren politischen Bezirken um Wien und 41–50 % im politischen Bezirk Neusiedl / See.

Im Folgenden wird auf die Auswirkung des Klimawandels auf Heizungs- und Kühlungsnotwendigkeit eingegangen. Abbildung 6.5 zeigt jene Regionen mit der größten Zunahme an Kühlgradtagen (die kumulierten stündlichen Temperaturdifferenzen zwischen der Kühlgrenztemperatur von 18,3 °C und der aktuellen Außentemperatur): es handelt sich dabei vor allem um Wien, das (nördliche und südliche) Wiener Becken, das Tullnerfeld sowie große Teile des Burgenlandes und die Südsteiermark.

Abbildung 6.6 zeigt hingegen jene Regionen, wo die Bevölkerung vom Klimawandel durch eine deutlich geringere Zahl an Heizgradtagen (die kumulierten stündlichen Temperaturdifferenzen zwischen der 20 °C Zimmertemperatur und der aktuellen Außentemperatur > 12 °C) am meisten profitiert: es sind dies nahezu alle alpinen Bezirke Westösterreichs sowie der Obersteiermark.

6.2.2 Soziale Betroffenheit durch Extremereignisse

Nachdem in Abschnitt 6.2.1 temperaturanstiegsbedingte Wirkungen des Klimawandels betrachtet wurden, wird hier insbesondere auf witterungsbedingte Extremereignisse und deren Effekte auf Naturgefahren hinsichtlich ihrer sozialen Betroffenheit eingegangen. Vor allem niederschlagsbedingte Extremereignisse sind aufgrund ihrer Schadenswirkungen und den daraus resultierenden Kosten für sozial Schwächere besonders relevant. So wurden in einer Munich Re-Studie zwischen 1980 und 2010 für Österreich wetter- und witterungsbedingte Schäden (durch größere Ereignisse) von rund 9,5 Mrd. € registriert[6].

Von künftig häufiger auftretenden Extremereignissen, wie Starkregen und daraus folgenden Überschwemmungen bzw.

[6] http://www.umweltbundesamt.at/extremereignisse/

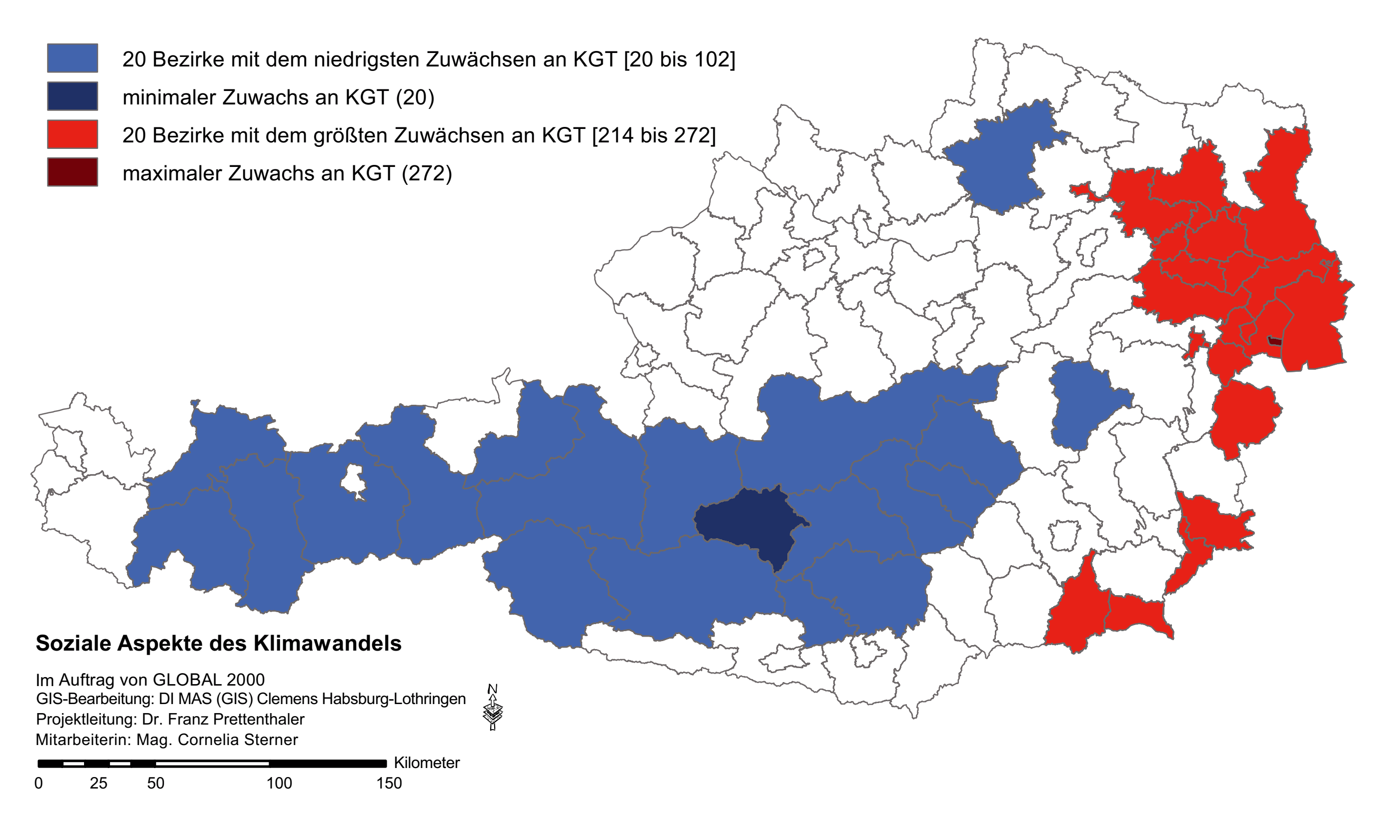


Abbildung 6.5 Die Bezirke mit den kleinsten und größten Zuwächsen an Kühlgradtagen 1981 bis 2041. Quelle: Prettenthaler et al. (2008b)
Figure 6.5 Districts with lowest and highest increase of cooling days 1981 to 2041. Source: Prettenthaler et al. (2008b)

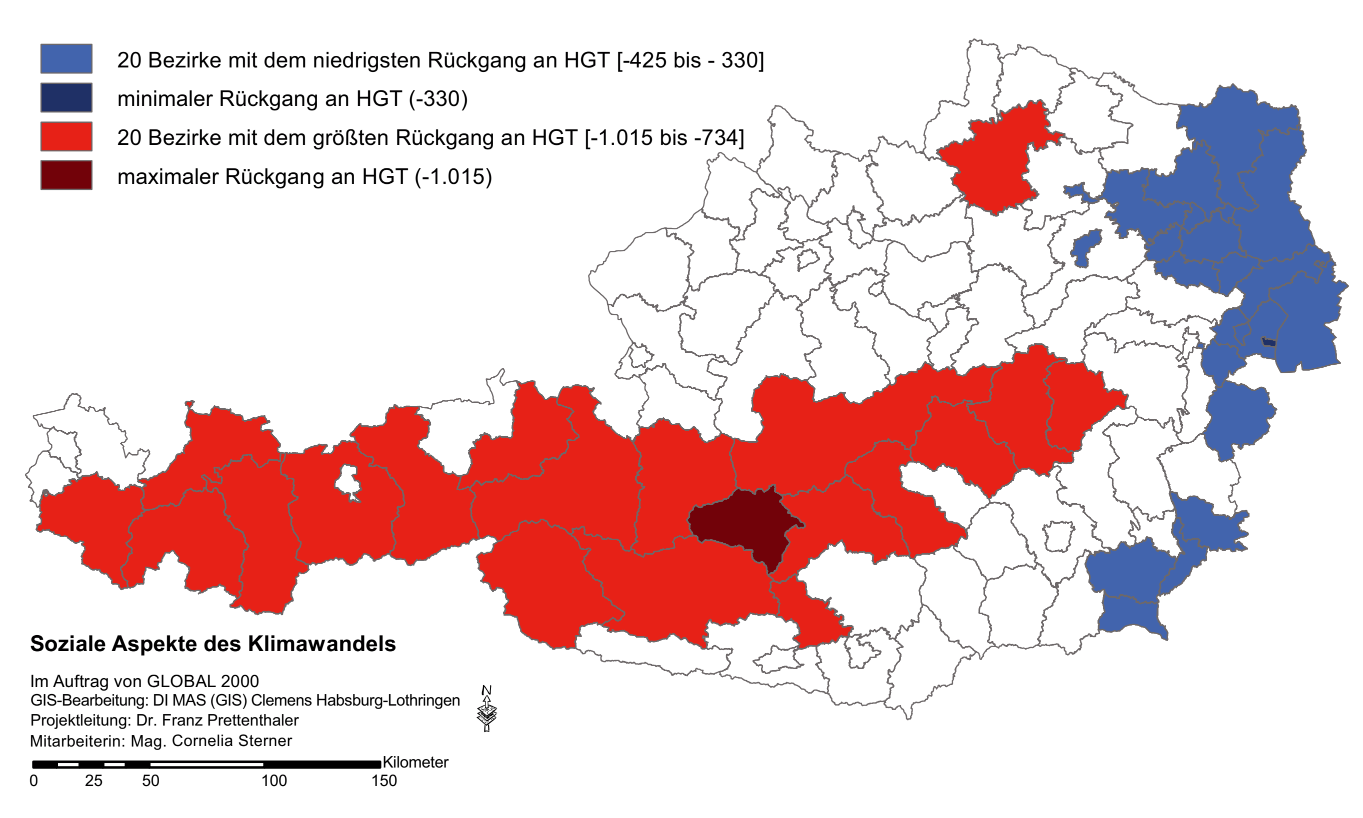


Abbildung 6.6 Die Bezirke mit dem kleinsten und größten Rückgang an Heizgradtagen 1981 bis 2041. Quelle: Prettenthaler et al. (2008b)
Figure 6.6 Districts with lowest and highest decrease of heating days 1981 to 2041. Source: Prettenthaler et al. (2008b)

in alpinen Lagen auch Hangrutschungen und Murenabgängen, wird die einkommensschwache Bevölkerung stärker und in mehrfacher Hinsicht betroffen sein. Einerseits wegen der eher gefährdeten Lagen ihrer Wohnungen und Häuser im Hinblick auf die Auswirkung von Extremereignissen, da diese Wohnhäuser oft auch weniger widerstandsfähig bzw. geschützt gegenüber derlei Gefahren sind und letztlich wegen einer fehlenden oder zu geringen Deckung bei der Versicherung von Schäden im Eintrittsfall.

Eine weitere räumliche Eingrenzung der potenziell betroffenen Bevölkerung ist hier nur begrenzt möglich. Generell können die BewohnerInnen aller flussnahen Bereiche als von Hochwassern stärker potenziell betroffen gelten, ebenso die BewohnerInnen im Umfeld von alpinen Wildbächen und Gebirgsflüssen.

6.2.3 Betroffenheit einkommensschwacher Bevölkerungsgruppen durch höhere Kosten

Vor allem einkommensschwache Bevölkerungsgruppen sind auch indirekt von den Auswirkungen des Klimawandels stärker betroffen: sie geben einen größeren Anteil ihres Einkommens für Nahrungsmittel aus und werden von klimabedingten oder klimapolitikbedingten (Steuern…) Preissteigerungen bei diesen Produktgruppen besonders betroffen. Es wird geschätzt, dass im Laufe des 21. Jahrhunderts ein Viertel der globalen Lebensmittelproduktion durch – unter anderem vom Klimawandel verursachte – Umweltschäden verloren gehen wird (Nellemann et al., 2009). Die Lebensmittelpreise werden deutlich ansteigen, wobei die Preisschwankungen durch den Klimawandel mit verursacht sind (OECD-FAO, 2011). In Kombination mit stagnierenden Haushaltseinkommen und steigenden Energiepreisen wird dies die Kaufkraft der einkommensschwächeren Bevölkerungsgruppen weiter schmälern (Brunner et al., 2012), d. h., dass diese bei begrenzten finanziellen Mitteln entweder beim Essen oder beim Heizen sparen zu müssen, wobei dies klimabedingt in Zukunft eher „Cool-or-Eat“-Dilemmata sein werden.

Darüber hinaus haben die einkommensschwachen Bevölkerungsgruppen aus finanziellen Gründen weniger Verhinderungs- und Ausweichoptionen gegenüber den zu erwartenden Entwicklungen: sie können sich seltener Schadensminderungsmaßnahmen und Anpassungsmaßnahmen (z. B. Wohnen in hochwassersicheren Häusern) oder Effizienzmaßnahmen (Wärmedämmung, passive Kühlung etc.) leisten (Prettenthaler et al., 2008a; Ekardt, 2010). Darauf sei hier nicht eingegangen – dies ist im Band 3 nachzulesen, welcher sich mit Anpassungs- und Minderungsmaßnahmen befasst.

Für die Zukunft ist mit keiner deutlichen Besserung der sozioökonomischen Lage zu rechnen. Die Arbeitslosenquote in Österreich stieg in den letzten 10 Jahren von 2–3 % auf rund 5–6 % (Biffl, 2011). Für die künftigen Dekaden wird vor allem im produzierenden Sektor mit keiner wesentlichen Besserung zu rechnen sein. Gründe hierfür sind die Globalisierung der Wirtschaft, das Aufstreben mehrerer großer Schwellenländer, sowie der Drang zur Automatisierung und zum Arbeitskräfteabbau. Gerade die bereits jetzt ökonomisch Schwachen mit geringer Bildung und Ausbildung werden jene sein, die von Arbeitslosigkeit weiter am stärksten betroffen sein werden.

6.2.4 Klimawandel und Gender

Wenn soziale Differenzen im Hinblick auf Betroffenheit (und Verursachung) des Klimawandels betrachtet werden, muss auch die Genderdimension thematisiert werden. Der Zusammenhang von Gender und Klimawandel ist einer, dem erst in letzter Zeit verstärkt Aufmerksamkeit gewidmet wurde. Frauen handeln in vielen Bereichen klimafreundlicher als Männer, etwa in Bezug auf Mobilität (Women's Environmental Network, 2010). Ebenso können die Auswirkungen von Extremwetterereignissen geschlechtsspezifisch unterschiedlich sein, wobei diese Auswirkungen in Gesellschaften mit großer Ungleichheit zwischen den Geschlechtern deutlich ausgeprägter sind, aber auch in Industrieländern auftreten. So zeigen Studien, dass während der Hitzewelle 2003 in Europa deutlich mehr Frauen zu Tode gekommen sind – und zwar in allen Altersgruppen (Women's Environmental Network, 2010). Bei „Hurricane Mitch“ wiederum kamen in Zentralamerika mehr Männer unmittelbar ums Leben, da sie im Vergleich zu Frauen weniger Sicherheitsmaßnahmen ergriffen hatten als der Hurrikan durchzog, was mit risikoaffinem männlichen Verhalten in Verbindung gebracht werden kann (Demetriades und Esplen, 2010).

Armut ist in hohem Maße weiblich. Bei weiblichen Einpersonenhaushalten in Pension ist das Armutsrisiko etwa doppelt so hoch wie jenes der Männer (Biffl, 2011; BMASK, 2011). Der weibliche Alltag ist häufig durch Mehrfachbelastungen gekennzeichnet, auch in Gesellschaften, in denen Geschlechtergerechtigkeit akzeptierte Norm ist. Versorgungs- und Hausarbeit wird in österreichischen Haushalten, selbst bei Vollerwerbstätigkeit beider Partner und Kindern im Haushalt, noch immer weitgehend von Frauen geleistet (Statistik Austria, 2009). Klimabedingte Preissteigerungen bei Energie und Lebensmitteln würden Frauen, denen die Verantwortlichkeit für Haus- und Versorgungsarbeit zugeschrieben wird, stärker belasten als Männer. Dies trifft in

besonderem Maße für Frauen zu, die armutsgefährdet sind, vor allem AlleinerzieherInnen. Diese Gruppe ist auch eine, deren finanzielle und soziale Ressourcen bei der Bewältigung von klimabedingten Ereignissen (z. B. thermischen Effekten) besonders eingeschränkt sind.

6.2.5 Auswirkung des Klimawandels auf Migrationsströme nach Österreich

Anhand der so genannten Klimaflucht wird deutlich, dass der Klimawandel weltweit Armut und soziale Ungleichheit verschärft (Beck, 2010; Schubert et al., 2008). Die Ursachen dafür sind mannigfaltig: lange Dürren, damit einhergehender Wasser- und Nahrungsmangel, Hitzewellen, der Anstieg des Meeresspiegels, Stürme etc. Die am stärksten betroffenen Regionen liegen zwar nicht in Österreich, aber die Auswirkungen können Österreich betreffen. In Zukunft wird verstärkt mit Migrationsströmen aus außereuropäischen, eventuell auch süd- und südosteuropäischen Ländern als Folge des Klimawandels zu rechnen sein. Migrationsziele werden Regionen in Südwest-, Mittel- und Nordeuropa, also auch Österreich sein, um den Klimabedingungen und den sich dadurch weiter verschlechternden Lebens- und Einkommensbedingungen in den Ursprungsländern zu entkommen und anderswo neue Chancen zu ergreifen.

2006 wurde für Österreich eine Nettoeinwanderungsquote von 3,5 Personen je 1 000 EinwohnerInnen (EW) angegeben, die Schätzung für 2009 liegt mit 2,5 Personen / 1 000 EW etwas darunter (Erf et al., 2009). Österreichs Bundesländer gehören in Europa künftig zu den Regionen mit höheren Migrationsraten: für den Zeitraum 2045 bis 2050 wird mit Einwanderungsraten von 5–10 Personen aus außereuropäischen Ländern je 1 000 EW gerechnet. Die ESPON DEMIFER-Studie, nennt Staaten aus Süd-, Mittel und Nordeuropa als künftige Einwanderungsländer. Für Österreich wurden generell Zunahmen der außereuropäischen Migrationsraten von > 10 Personen je 1 000 EW geschätzt. Bloß für Niederösterreich wird ein etwas geringerer Zuwachs der Einwanderungsquote zwischen 5 und 10 Wandernde je 1 000 EW vorhergesagt (Erf et al., 2009).

Wanderungsziele für derartige Flüchtlinge, die immer auch Wirtschaftsflüchtlinge sind, werden vor allem die wirtschaftsstarken Regionen sein, wo eine größere Chance hinsichtlich besserer Arbeits- und damit Einkommensmöglichkeiten erwartet werden – in Österreich also vor allem der Raum Wien und die größeren Landeshauptstädte mit ihrem Umland.

Klimaflüchtlinge werden damit (auch) in Österreich vor allem in den Städten Arbeit und Wohnraum suchen. Als sozial Schwächste werden sie die klimabedingt größten Nachteile innerhalb der österreichischen Gesellschaft erleiden. Klimaflüchtlinge werden auf bereits in Österreich ansässige Menschen mit Migrationshintergrund treffen, die ohnehin schon zu den weniger privilegierten Bevölkerungsgruppen in Österreich zählen, da sie bei der Armutsgefährdung deutlich überrepräsentiert und durch eingeschränkte gesellschaftliche Teilhabechancen gekennzeichnet sind (BMASK, 2011). Daraus kann ein Konkurrenzkampf um Arbeitsplätze und Ressourcen entstehen.

Demokratiepolitisch kann klimabedingte Migration innergesellschaftliche Konflikte weiter verschärfen (Schubert et al., 2008), wenn verstärkt xenophobe Vorurteile ausgesprochen werden, welche gleichheitsbezogene Demokratieelemente unterminieren (Clausen, 2010). Darüber hinaus können Sprachbarrieren bei diesen Gruppen im Katastrophenfall besonders zu „Warnlücken“ führen.

6.2.6 Forschungsbedarf

Die sozialen Aspekte des Klimawandels konkret für Österreich sind nur unzureichend erforscht. Gerade die Aspekte Stadtklima und Klimakomfort – outdoor und indoor – sollten im Hinblick auf sozial benachteiligte Bevölkerungsschichten hinterfragt werden. Dem Aspekt der relativ höheren Kosten für Einkommensschwächere durch Effekte des Klimawandels (z. B. Anstieg der Nahrungsmittelpreise, Anstieg der Energiepreise) wird derzeit in keiner Weise Rechnung getragen. Hier besteht demnach ein erhöhter Forschungsbedarf.

6.3 Potenzielle ökonomische Auswirkungen des Klimawandels
6.3 Potential economic impacts of climate change

Die ökonomischen Auswirkungen des Klimawandels stehen spätestens seit dem Erscheinen des Stern-Reports (Stern, 2007) sowie des 4. Sachstandsberichts des IPCC (IPCC, 2007) im Zentrum des Interesses von Forschung und Politik. Politische EntscheidungsträgerInnen zeigen ein fundamentales Interesse an einer Erfassung der durch den Klimawandel bedingten Kosten (Watkiss, 2011). Ebenfalls gerät die finanzielle Sicherstellung der Finanzierung von Anpassungsmaßnahmen mehr und mehr in den Blickpunkt – sowohl auf internationaler Ebene im Rahmen des „Green Climate Funds“, als auch auf europäischer Ebene im Zuge der Erarbeitung der europäischen Anpassungsstrategie (EK, 2009) sowie in denjenigen Län-

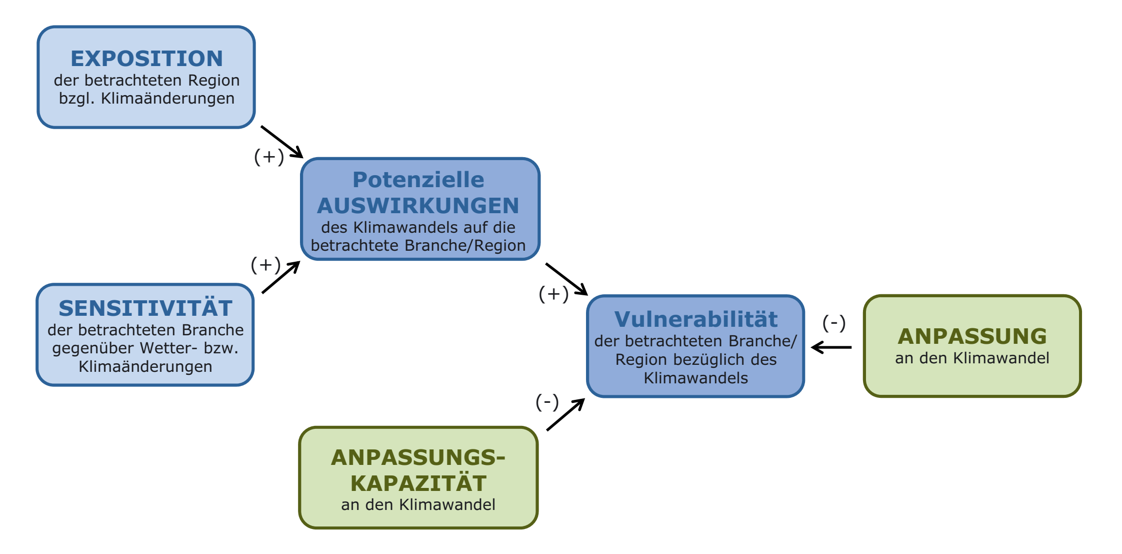


Abbildung 6.7 Potenzielle Auswirkungen des Klimawandels und Vulnerabilität bezüglich des Klimawandels. Adaptiert nach IPCC (2007)

Figure 6.7 Potential impacts of climate change and vulnerability to climate change. Adapted after IPCC (2007)

dern, die bereits den Prozess der Erstellung von Anpassungsstrategien begonnen bzw. abgeschlossen haben (siehe dazu BMLFUW, 2012).

Da bei der Drucklegung dieses Reports noch keine gesamte Darstellung der ökonomischen Effekte von Klimafolgeschäden in Österreich vorliegt, kann hier nur eine grobe Beurteilung unter Verwendung von Quellen für Europa, den Alpenraum und Österreich generell stattfinden.

6.3.1 Potenzielle ökonomische Auswirkungen des Klimawandels

Die potenziellen Auswirkungen (oder Folgen) des Klimawandels ergeben sich aus dem Zusammenwirken der Exposition einer Region gegenüber dem Klimawandel einerseits und andererseits der Sensitivität einer Region gegenüber diesen Veränderungen, wie in Abbildung 6.7 dargestellt (Füssel und Klein, 2006). Die Sensitivität hängt wiederum von den physischen, umweltbezogenen, sozialen, kulturellen und ökonomischen Charakteristiken einer Region ab. Somit kann der gleiche Klimastimulus in unterschiedlichen Regionen zu unterschiedlichen Auswirkungen führen, z. B. wenn eine Region stärker landwirtschaftlich oder touristisch geprägt ist als eine andere Region (ESPON Climate, 2011a). Die Vulnerabilität einer Region ergibt sich aus dem Zusammenspiel von Klimaauswirkungen und Anpassungskapazität, wobei die Anpassungskapazität die Fähigkeit, mit einem veränderten Klima umzugehen, bezeichnet (Füssel und Klein, 2006).

Unter den ökonomischen Auswirkungen des Klimawandels werden häufig die sektoralen Auswirkungen, die sich durch ein verändertes Klima ergeben, verstanden. Untersucht werden hier einerseits die Primärsektoren Land- und Forstwirtschaft, sowie andere klimasensitive Sektoren wie Tourismus, Energiewirtschaft oder Wasserwirtschaft. Neben spezifischen Sektoren werden auch Auswirkungen auf Vermögensbestände („assets“) wie Infrastruktur (Hochwasserschutzbauten, Verkehrs- und Siedlungsstrukturen) sowie auf das Gesundheitssystem ermittelt. Die wesentlichen Methoden sind hier ökonometrische Modelle, sektorspezifische Optimierungsmodelle sowie Kosten-Nutzen-Analysen (Watkiss und Hunt, 2010).

Zusätzlich zu den ökonomischen Auswirkungen innerhalb der betroffenen Sektoren und Bereiche können die Auswirkungen auf vor- und nachgelagerte Sektoren sowie Verschiebungen der Nachfrage, z. B. infolge eines Preisanstiegs eines klimaabhängigen Gutes, mittels Input-Output- oder Computable General Equilibrium (CGE)-Modellen berücksichtigt werden (Rose, 2004). Je nach Stärke dieser sektoralen Verflechtungen können die Effekte auf den direkt betroffenen Sektor oder aber die gesamtwirtschaftliche Wirkung dominierend sein. Beispiele für Sektoren mit starker gesamtwirtschaftlicher Bedeutung sind etwa die Elektrizitätswirtschaft oder der Tourismus.

Im Unterschied zu den sektoralen (auch als „bottom up“ bezeichneten) Studien werden auch die aggregierten Auswirkungen des Klimawandels ermittelt, wobei hier von aggregierten oder sozialen Klimaschadenskosten gesprochen wird (Watkiss, 2011). Auf globaler oder kontinentaler Ebene erfolgt diese Abschätzung meist mittels sogenannter „Integrated Assessment“-Modelle (wie DICE FUND, PAGE oder MERGE), welche die vereinfachten Zusammenhänge zwischen klimatischen und ökonomischen Systemen abbilden. Als Modellergebnis dieser „Top-Down“-Modelle werden die Kosten des Klimawandels entweder als % des weltweiten Bruttoinlandsprodukts für eine vorgegebene Zielperiode, als diskontierte zukünftige

Zunehmende Unsicherheit in der Bewertung →

↓ Zunehmende Unsicherheit in der Vorhersage des Klimawandels

	Marktfähig (materiell)	**Nicht-marktfähig (nicht-materiell)**	**Sozial beeinflusst**
Vorhersage (z.B. Zunahme der Durchschnitts-temperatur, Anstieg des Meeresspiegels)	Hochwasserschutz Veränderter Energiebedarf (Heizen, Kühlen)	Hitzestress Verlust von Feuchtgebieten	Regionale Kosten Investitionen
Begrenzte Risiken (z.B. Überflutungen, Dürre, …)	Landwirtschaftliche Erträge Wasserverfügbarkeit Variabilität (Dürre, Überflutungen)	Ökosystemveränderu ngen Biodiversität Verlust von Leben Indirekte soziale Effekte	Relative Veränderungen (komparative Vor/Nachteile), Marktstrukturen
Systemveränderungen und unerwartete Ereignisse	Siehe oben, zusätzlich: Signifikanter Verlust von Land und Ressourcen Nicht-marginale Effekte	Soziale Effekte höherer Ordnung Regionaler Zusammenbruch Irreversible Verluste	Regionaler Zusammenbruch

Abbildung 6.8 Unsicherheiten bei der ökonomischen Bewertung der Auswirkungen des Klimawandels. Adaptiert nach Watkiss und Downing (2008)

Figure 6.8 Uncertainties in the economic evaluation of climate change impacts Adapted after Watkiss and Downing (2008)

Kosten für vorgegebene Szenarien, oder als Grenzschadenskosten (Kosten einer zusätzlich emittierten Einheit) ausgedrückt (Watkiss, 2011).

Während diese Zahlen für politische Diskussionen, z. B. über Reduktionsziele, hilfreich sein können, ist sie für konkrete Entscheidungen bezüglich der Anpassung an den Klimawandel nicht geeignet, da auf Grund der hohen räumlichen Aggregation Fragen der Verteilung der Auswirkungen zwischen Regionen und Sektoren nicht adressiert werden können. Sie verdeutlicht jedoch, dass auf Grund von Unsicherheiten und Risiken nur ein Teil der Auswirkungen des Klimawandels monetär bewertet werden kann (vgl. Abb. 6.8). Die meisten Studien beschränken sich bislang auf Auswirkungen, die durch Märkte widergespiegelt werden; nicht-materielle Auswirkungen, z. B. auf Ökosysteme, werden bestenfalls qualitativ erfasst. Ebenso werden in der Regel vor allem jene Auswirkungen bewertet, bei denen die klimatologischen Änderungssignale über verschiedene globale und regionale Klimamodelle hinweg einheitlich sind, während andere Auswirkungen, bei denen die Richtung der Änderung unsicher ist, bzw. Änderungen in der Intensität und Häufigkeit von Extremereignissen bislang nur unzureichend berücksichtigt werden. Sozial beeinflusste Veränderungen, die sich z. B. durch das Zusammenwirken von klimatologischen und sozio-ökonomischen Veränderungen ergeben, werden ebenso nur unzureichend berücksichtigt (Watkiss, 2011).

Weitere Schwierigkeiten stellen sich bei der Frage, ob und falls ja wie zukünftige Nutzen und Kosten diskontiert werden sollen (Watkiss, 2011). Ein nicht triviales Problem stellt weiters die Vermeidung von Doppeltzählung, z. B. bei der Aggregation von regionalen Ergebnissen zu nationalen Ergebnissen oder bei der Aggregation von Schäden über mehrere Sektoren, dar (Metroeconomica, 2004). Die Frage der adäquaten räumlichen Auflösung der Studien ist insofern bedeutsam, als Nettoeffekte (Saldo aus Nutzen und Kosten) auf nationaler bzw. EU-Ebene schwach, die Bruttoeffekte sowie die Verteilung der Kosten und Nutzen auf verschiedene Regionen bzw. Gruppen jedoch durchaus bedeutsam sein können.

Aus diesen Defiziten ergibt sich ein Forschungsbedarf, sowohl international als auch für Österreich.

6.3.2 Quantifizierung ökonomischer Auswirkungen des Klimawandels

Die potenziellen ökonomischen Auswirkungen des Klimawandels ergeben sich aus den potenziellen physischen Auswirkungen des Klimawandels (Ertragsveränderungen, verändertes Wasserdargebot etc.) erfasst mit ihrem ökonomischen Wert (Preis von Getreide, Elektrizität etc.) (Metroeconomica, 2004). Somit müssen zunächst die physischen Auswirkungen des Klimawandels abgeschätzt werden, wobei hierbei direkte und indirekte Auswirkungen unterschieden werden (IPCC, 2007). Direkte Auswirkungen umfassen z. B. veränderte Schneehöhen, während indirekte Auswirkungen Änderungen der Skisaison oder der Nächtigungszahlen als Folge der direkten Auswirkungen darstellen.

Sowohl direkte als auch indirekte Auswirkungen können ökonomisch bewertet werden, wobei hier zu unterscheiden ist, ob es sich um eine Veränderung der Qualität eines Gutes oder einer Dienstleistung (vermindertes Skivergnügen, reduzierte Ökosystemdienstleitung) oder deren Quantität (veränderte Nachfrage) handelt (Metroeconomica, 2004). Weiters ist zu berücksichtigen, dass sich auch wirtschaftliche, technologische und politische Rahmenbedingungen verändern, weshalb die potenziellen ökonomischen Auswirkungen des Klimawandels relativ zu einem Referenz- oder Baseline-Szenario (Entwicklung ohne Klimawandel) ermittelt werden (Boyd und Hunt, 2006).

Die ökonomische Bewertung der potenziellen Auswirkungen des Klimawandels erfordert, dass die potenziellen direkten und indirekten Auswirkungen in ökonomische Werte übersetzt werden. Während indirekte Auswirkungen in der Regel sektorale Auswirkungen erfassen und somit Märkte für deren Bewertung existieren (bzw. marktähnliche Strukturen konstruiert werden können), sind einige direkte Auswirkungen des Klimawandels primär für Umweltsysteme relevant, deren Güter und Dienstleistungen nicht über Märkte gehandelt werden und daher schwer monetär fassbar sind. Soll diese Klasse von Auswirkungen bewertet werden, werden daher indirekte Bewertungsmethoden verwendet, wie Präventivausgaben oder Wiederherstellungskosten (Metroeconomica, 2004). In der Praxis werden jedoch häufig die ökonomischen Auswirkungen nicht quantitativ sondern nur qualitativ bewertet, indem z. B. Indizes der Betroffenheit gebildet werden (ESPON Climate, 2011b).

6.3.3 Ökonomische Auswirkungen des Klimawandels: Europa und die Alpen

Global betrachtet werden besonders folgende Länder und Regionen hohe Klimafolgekosten zu tragen haben (IPCC, 2007; UNDP, 2007):

- Jene Länder, die jetzt schon unter Klimavariabilität und etwa dem zeitlichen oder räumlichen Verschieben von Niederschlagszonen leiden.
- Jene Länder, die zunehmend von extremen Wetterereignissen und Witterungsperioden betroffen sein werden.
- Schließlich jene Länder, welche besonders verletzliche Wirtschafts- und instabile politische Strukturen (Schubert et al., 2008) aufweisen.

Zur ersten Gruppe sind besonders jene Länder und Regionen zu zählen, für die bereits jetzt Trockenheit der entscheidende limitierende Faktor ist. Dabei spielt eine wesentliche Rolle, dass diese Länder zumeist stark landwirtschaftlich geprägte sowie zu entwickelnde Volkswirtschaften aufweisen und somit zugleich auch in die dritte Gruppe fallen sowie darüber hinaus besonders (finanziell und technologisch bedingt) niedrige Anpassungskapazitäten aufweisen.

Auf europäischer Ebene zeigt sich mit Blick auf die bisherigen Untersuchungen ein Auseinanderfallen zwischen Nord und Süd. Während für Nordeuropa etwa für die Sektoren Energie, Land- und Forstwirtschaft negative Klimafolgekosten zu erwarten sind bzw. allenfalls mit Opportunitätskosten zu rechnen ist, werden die Länder Südeuropas mit signifikanten Klimafolgekosten zu rechnen haben.

Die bislang untersuchten Kostenfaktoren auf europäischer Ebene sind dabei insbesondere:

- Landwirtschaftliche Erträge
- Forstwirtschaftliche Erträge
- Energiekosten
- Kosten durch den Meeresspiegelanstieg
- Kosten durch Überschwemmungen

Ökonomisch relevant erscheint insbesondere die Funktion der Alpen als Wasserspeicher für große Teile Europas. So ist zwar derzeit direkt in den Alpen kaum Wassermangel spürbar, jedoch können verminderte sommerliche Niederschläge und die abnehmende Kompensation selbiger durch die in ihrem Volumen stark zurückgehenden Gletscher die Wasserstände etwa an Rhein, Donau und Po auf Niedrigstände bringen, die viele Sektoren treffen und somit kostenrelevant werden etwa durch:

- Vermindertes Wasserdargebot für landwirtschaftliche Bewässerungszwecke,
- Erhöhte Wasseraufbereitungskosten durch geringere Verdünnungseffekte,
- Geringere Leistung von Wasserkraftwerken (EEA, 2012).

In der ESPON-Studie wurden die potenziellen Klimafolgen für Europa auf NUTS 3-Ebene untersucht und meist auf NUTS 2-Ebene dargestellt. Dabei wurde zwischen physischen Klimafolgen (primär Schäden an der Infrastruktur, vornehmlich durch Hochwasser und Sturmfluten / Meeresspiegelanstieg), Umweltfolgen (Erosionsprozesse, Biodiversitätsverluste, Waldbrand etc.), ökonomische Folgen (direkte Folgen für direkt klimaabhängige Sektoren Land- / Forstwirtschaft und Tourismus), soziale Folgen (direkte Folgen für die Bevölkerung durch Meeresspiegelanstieg, Hochwassergefahr und Hitzewellen) sowie Folgen für Kulturgüter (insbesondere in Küstenstädten Südeuropas) differenziert.

Diese Gliederung limitiert die Betrachtung der Wechselwirkungen zwischen Umwelt- und ökonomischen Folgen und negiert die Einbeziehung indirekter Effekte (z. B. Produktionsausfälle durch Infrastrukturschäden). Sie zeigt zudem Einschränkungen durch die Wahl lediglich eines Klimamodells (CCLM) und Emissionsszenarios (A1B) sowie des Betrachtungszeitraums 2071 bis 2100, unterstreicht aber die Klimafolgentrennung zwischen Nord- und Südeuropa.

Die Regions 2020-Studie (ÖIR et al., 2011) untersucht ebenfalls Vulnerabilitäten gegenüber dem Klimawandel bis 2020 in Europa auf NUTS 2-Ebene. Vulnerabilitäten werden hier für die Bereiche Land- und Forstwirtschaft, Ökosysteme, Naturgefahren und Gefährdung von Küsten, Gesundheit und Hitzewellen, Wasserabhängigkeit und Sommertourismus anhand von mehreren Indikatoren für Exposition, Sensitivität und Anpassungskapazität abgeschätzt. Danach werden die Regionen nach Ähnlichkeiten in Sensitivität und Anpassungskapazität gruppiert, um zu einer gesamthaften Einschätzung der Vulnerabilität gegenüber dem Klimawandel zu kommen. Diese unterschiedlich vulnerablen Regionen in Europa sind (vgl. regions2020.oir.at / für interaktive Karten):

- Regionen, die auf den Klimawandel vorbereitet sind: einerseits atlantische Regionen (Großbritannien, Irland, Norwegen sowie Teile von Finnland), andererseits kontinentaleuropäische Regionen mit hoher Anpassungskapazität (Frankreich, Deutschland, Dänemark, Niederlande mit Ausnahme der Küstengebiete).
- Regionen, die verstärkt durch hydrologische Ereignisse betroffen sind: hohe Sensitivität aufgrund des Schwerpunkts auf Wasserkraft einerseits im Alpenraum und Skandinavien (Österreich, Slowenien, Schweden), andererseits in einigen atlantischen Küstenregionen Kontinentaleuropas (Gefahr von Sturmfluten).
- Regionen, die ein Anpassungsdefizit aufweisen: Polen (auf Grund von Defiziten in der Umsetzung der Habitat-Richtlinie) sowie andere osteuropäische Staaten und EU-Beitrittskandidaten.
- Regionen, die durch mehrfache signifikante Vulnerabilitäten charakterisiert sind: Küstengebiete (hohe Exposition gegenüber Stürmen) sowie Gebiete im Landesinneren (infolge geringerer Wasserverfügbarkeit) in Südeuropa (Spanien, Portugal, Italien, Kroatien, Griechenland). Die multiplen Vulnerabilitäten betreffen hier die Abhängigkeit von Bewässerung in der Landwirtschaft und Industrie, die Gefährdung großer natürlicher Lebensräume, die Zunahme von Hitzewellen sowie die Bedeutung als Tourismusregion.

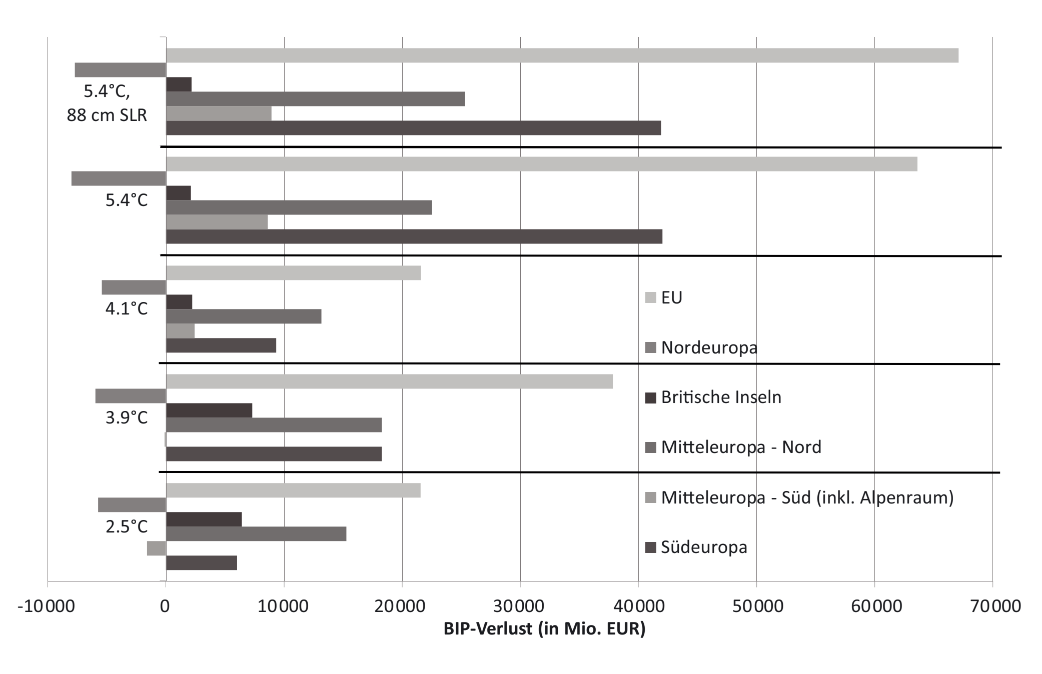


Abbildung 6.9 BIP-Verluste in den fünf PESETA-Regionen für die fünf PESETA-Szenarien. Die Schäden des modellierten 2080er-Klimas wurden dabei in die heutige EU-Volkswirtschaft projiziert.
Mitteleuropa-Nord = Deutschland, Belgien, Niederlande, Luxemburg, Polen; Mitteleuropa-Süd = Frankreich, Österreich, Tschechien, Slowakei, Ungarn, Slowenien, Rumänien; Nordeuropa = Dänemark, Schweden, Finnland, Estland, Lettland, Litauen; Southern Europe = Spanien, Italien, Griechenland, Bulgarien; Britische Inseln = Großbritannien, Irland. Quelle: Ciscar et al., 2010b, PNAS 108/7, 2678–2683

Figure 6.9 BIP losses in the five PESETA regions and for the five scenarios. The damages of 2080s climate have been projected in today's economy. Source: Ciscar et al. (2010b), PNAS 108/7, 2678–2683

Ein weiterer Beleg für die mögliche Verschärfung der Disparitäten zwischen Nord- / Mitteleuropa einerseits und Süd- / Osteuropa andererseits sind die Resultate der PESETA-Studie. Im Zuge von PESETA wurden die Sektoren bzw. regionalen Schwerpunkte Landwirtschaft, Flusseinzugsgebiete (Hochwasser), Küsten (Meeresspiegelanstieg / Sturmfluten), Tourismus und Gesundheit analysiert. Neben direkten Effekten wurden dazu auch mittels CGE-Modellierung indirekte Effekte untersucht (Ciscar et al., 2010a).

Modelliert wurden im Zuge von PESETA die Klimafolgen und deren ökonomische Auswirkungen des Klimas der 2080er Jahre in der Jetztzeit. Dadurch wurden die enormen Unsicherheiten, die sich aus dem sozio-ökonomischen Strukturwandel ergeben, bewusst vermieden. Zugrunde gelegt wurden bei der Modellierung die SRES-Szenarien A2 und B2, welche mit ECHAM5-RCAO sowie HADCM3-HIRHAM angetrieben wurden. Die sich daraus ergebenden vier Szenario-Konstellationen wurden der Anschaulichkeit halber mit Temperaturwerten belegt (2,5 °C / 3,9 °C / 4,1 °C / 5,4 °C) und das 5,4 °C-Szenario zudem mit einem stärkeren Meeresspiegelanstiegsszenario (88 cm) zu einem fünften Szenario verbunden. (Ciscar et al., 2010a).

Das Ergebnis (vgl. Abbildung 6.9) entspricht in weiten Teilen den ESPON-Darstellungen, erlaubt jedoch darüber hinaus eine ökonomische Bewertung, die in absoluten BIP-Verlusten dargestellt wurde.

Wesentliche Fortschritte bei der Abschätzung von Klimafolgekosten im europäischen Maßstab wurden im Zuge des EU-FP7-Projekts „ClimateCost“ erzielt (ClimateCost, 2010). Die Schwerpunkte für die Darstellung der Kosten lagen dabei auf den Sektoren Energie, Landwirtschaft und Gesundheit sowie – ähnlich wie bei PESETA – auf den regionalen Schwerpunkten Küsten und Flusseinzugsgebiete.

Im Gegensatz zu PESETA wurden die Ergebnisse jedoch in drei Zeitschnitten (2020er, 2050er und 2080er Jahre) modelliert und größtenteils in jährlich zu erwartenden Schäden (in €, nicht diskontiert) dargestellt. (Watkiss, 2011)

Besonders hohe Kosten wurden dabei für hochwasserbedingte Schäden ermittelt. Diese mit Hilfe von LISFLOOD modellierten Schäden liegen demzufolge für das mittlere A1B-Szenario in den EU-27 bei rund 20 Mrd. € / Jahr in den 2020er Jahren, 46 Mrd. € / Jahr in den 2050er Jahren und bei 98 Mrd. € / Jahr in den 2080er Jahren.

Eine europapolitisch wesentliche Aussage aller Projekte, die sich mit den ökonomischen Folgen des Klimawandels auf kontinentaler Ebene befassen, besteht darin, dass die Risiken im Süden und die Chancen im Norden Europas liegen:

- Während demnach Südeuropa aufgrund vermehrter Dürren und Trockenperioden um land- und forstwirtschaftliche Potenziale bangen muss, können nordeuropäische Länder Ihre Grenzertragsregionen temperaturbedingt in Richtung Norden bzw. vertikal ausdehnen.
- Während Nordeuropa sinkende Heizkosten verzeichnen wird, werden die (marginalen) Heizkostenersparnisse in Südeuropa ganz klar durch vermehrten Kühlungsbedarf aufgezehrt und in einigen Ländern gegebenenfalls überkompensiert. (Mima, Criqui und Watkiss, 2011).

Zusammenfassend können folgende Ergebnisse festgehalten werden. Bezüglich klimatischer Veränderungen wurden Vulnerabilitäten auf europäischer Ebene vor allem für die Bereiche Land- und Forstwirtschaft, Energie, Gesundheit sowie Überschwemmungen (an Küsten und Flüssen) untersucht. Es bestehen somit inhaltliche Lücken, da nur ausgewählte Auswirkungen untersucht wurden. Weiters bestehen methodische Lücken, da die Mehrzahl der Studien nur wenige Klimaszenarien berücksichtigt und viele erforderliche Daten für die Abschätzung regionaler Auswirkungen nicht in entsprechend hoher räumlicher Auflösung vorliegen. Viele Studien beschränken sich zudem auf Abschätzungen der Vulnerabilität und wenn die Auswirkungen des Klimawandels ebenfalls erfasst werden, dann werden häufig sozio-ökonomische Veränderungen, die das Ausmaß der Folgen mit beeinflussen, nicht oder nur unzureichend berücksichtigt. Es bedarf somit zusätzlicher Forschung, um diese Lücken zu schließen, vor allem um von einer Abschätzung der Vulnerabilität zu einer Abschätzung der ökonomischen Auswirkungen des Klimawandels, unter Berücksichtigung sonstiger gesellschaftlicher Veränderungen, zu gelangen.

6.3.4 Ökonomische Auswirkungen des Klimawandels: Erste Ergebnisse für Österreich

Die Lage Österreichs lässt sich bezüglich der zu erwartenden Klimafolgekosten im europäischen Kontext wohl am besten mit „intermediär“ umschreiben (ÖIR, 2011).

Einerseits wird die zu erwartende höhere Volatilität im Niederschlagsregime primär die Land- und Forstwirtschaft (mit Einschränkungen auch die Energie- und Wasserwirtschaft) der östlichen und südöstlichen Landesteile betreffen, während andererseits die potenzielle Zunahme extremer Niederschlagsereignisse sowie deren mittelbare Folgen (Überschwemmungen und Massenbewegungen) vor allem im alpinen und voralpinen Raum sowie in einigen Flusstälern hohe Schadenspotenziale für die Infrastruktur zeitigen wird. Die Schadens-

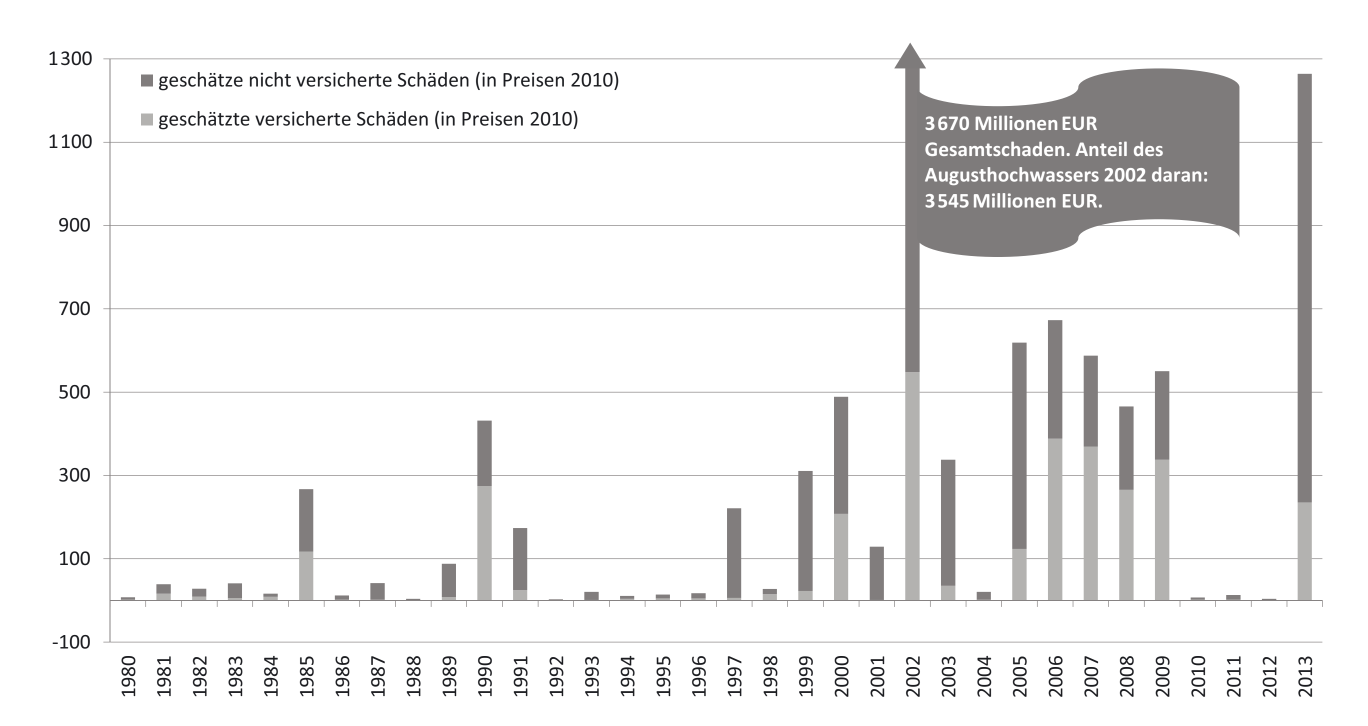


Abbildung 6.10 Direkte Schäden durch meteorologische Extremereignisse in Österreich in den letzten 32 Jahren (in Preisen von 2010). Quelle: © 2014 Munich Re, Geo Risks Research, NatCatSERVICE

Figure 6.10 Direct damages of meteorological extreme events in Austria for the last 32 years (2010 prices). Source: © 2014 Munich Re, Geo Risks Research, NatCatSERVICE

daten der Munich Re der letzten 32 Jahre für Österreich geben einen wichtigen Anhaltspunkt, wie groß das Schadenspotenzial durch Überschwemmungen, Stürme, Massenbewegungen, Hitze- und Kältewellen ist. Die vom Munich Re / NatCat-Service für Österreich ausgewiesenen Gesamtschäden durch extreme Wetterereignisse (vgl. Abbildung 6.10) liegen für 1980 bis 2013 bei rund 10,6 Mrd. € (in Preisen von 2010). Dabei gibt es einen stark ansteigenden Trend der mittleren jährlichen Schäden, die 1981 bis 1990 / 1991 bis 2000 / 2001 bis 2010 bei rund 97 / 129 / 706 Millionen € lagen. Dafür sind jedoch sowohl meteorologische Ereignisse (Anzahl und Intensität) verantwortlich, als auch die Exposition von Sachwerten. Insbesondere die Hochwasser 2002 (ca. 3,5 Mrd. €), 2005 (knapp 0,6 Mrd. €) und 2013 (knapp 0,7 Mrd. €) sowie mehrere starke Winterstürme mit Schäden von jeweils mehreren hundert Millionen € schlugen seit 2002 zu Buche.

Dabei handelt es sich lediglich um die direkten Schadenskosten, die durch Wiederherstellung und Reparaturen anfielen. Indirekte Folgewirkungen sind hierbei nicht erfasst.

Ebenfalls sind nur größere und größtenteils kurze Ereignisse erfasst. Damit verbleiben bei diesen Zahlen viele kleine und auch sich langsam aufbauende Schäden (durch extreme Witterungsperioden) vielfach unberücksichtigt.

Mit hoher Wahrscheinlichkeit muss davon ausgegangen werden, dass die winterliche Schneedecke immer größere zeitliche und räumliche Lücken aufweisen wird und damit Kosten in Form von geringerer Betten-, Lift und Gastronomieauslastung entstehen. Andererseits sollten sich die ökonomischen Folgewirkungen des Klimawandels in Österreich zumindest in den nächsten Dekaden in einem Rahmen bewegen, der in etwa zwischen den signifikanten ökonomischen Folgen und Kosten Südeuropas und den moderaten Nordeuropas liegen könnte (vgl. Abschnitt 6.3.3 zu den Ergebnissen nach europäischen Regionen).

Zu den Auswirkungen des Klimawandels in ausgewählten Sektoren vergleiche Abschnitte 6.4–6.7.

6.3.5 Zusammenhang mit Klimawandelanpassung

Grundsätzlich kann der Zusammenhang zwischen Klimafolgekosten, Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen und Residualschäden nach Anpassung wie in Abbildung 6.11 dargestellt werden (Stern et al., 2007). Somit kann Anpassung die Kosten des Klimawandels reduzieren, jedoch in der Regel unvollständig, weshalb man von Residualschäden spricht. Entscheidend hierbei sind die Verläufe für die rote und grüne Kur-

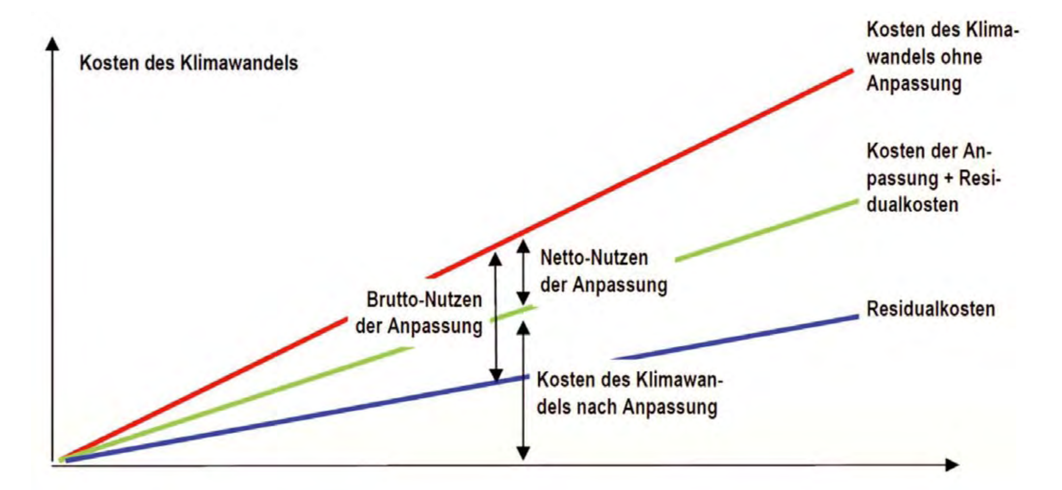


Abbildung 6.11 Kosten des Nichthandelns, Kosten der Anpassung, Residualschäden und Brutto- / Nettonutzen von Anpassungsmaßnahmen bei (idealisierter) konstanter Zunahme klimatischer Schadenstrigger im Laufe der Zeit. Quelle: Stern (Hrsg.), 2007, übersetzt

Figure 6.11 Cost of inaction, cost of adaptation, residual costs and gross / net benefit of adaptation measures. Source: Stern (ed.), 2007, translated

ve (in der Abbildung idealisiert als Geraden dargestellt), da die Differenz zwischen Beiden den Nettonutzen der Anpassung darstellt und somit als wesentliche Entscheidungshilfe für die Investition in Anpassung gelten muss. Der Anpassungsbedarf wird in Band 3, Kapitel 1–5 für Österreich insgesamt sowie für einzelne Sektoren (Land- und Forstwirtschaft, Energie, Verkehr, Industrie, Gebäude) behandelt.

6.4 Auswirkungen des Klimawandels auf den Tourismus
6.4 Climate change impacts on tourism

Der Tourismus ist ein bedeutender Wirtschaftszweig in Österreich. Der Beitrag zum BIP im Jahre 2008 betrug 4,9 % bzw. 7,5 % mit Berücksichtigung der indirekten Effekte (Statistik Austria et al., 2011). Da Tourismus mit Ausnahme des Städtetourismus vor allem abseits der wirtschaftlichen Zentren stattfindet, ist er in vielen vor allem ländlichen und alpinen Regionen ein wichtiger Wirtschaftszweig. Aufgrund der großen Bedeutung natürlicher Rahmenbedingungen – darunter auch das Wetter / Klima – für den Großteil touristischer Aktivitäten und Attraktionen, ist die Sensitivität des Sektors gegenüber klimatischen Veränderungen als sehr hoch einzustufen (Becken und Hay, 2007; Gössling und Hall, 2006; Scott, 2006). Veränderungen dieser natürlichen Gegebenheiten können dazu führen, dass sich die Rahmenbedingungen für bestimmte touristische Produkte verändern – zum Guten wie zum Schlechten. Für den Wintertourismus sind, aufgrund sich verschlechternder Schneebedingungen und steigender Beschneiungskosten, überwiegend negative Konsequenzen zu erwarten. Der Sommertourismus könnte allerdings von trockeneren, wärmeren klimatischen Verhältnissen profitieren, wohingegen der Städtetourismus in den Hitzemonaten benachteiligt sein, in den Übergangsjahreszeiten jedoch profitieren könnte.

In Bezug auf Tourismusthemen ist zu erwarten, dass vor allem die Aktivitäten Wandern, Wassersport / Baden, Golf, Rad / Mountainbike vom Frühjahr bis in den Herbst vom Klimawandel profitieren könnten. Geschäftstourismus und Kulturthemen sind vermutlich weniger von klimatischen Änderungen betroffen, schneebasierte Aktivitäten im Winter sind dagegen tendenziell negativ betroffen (Formayer und Kromp-Kolb, 2009a). Einige dieser Themen, zu denen detailliertere Studien existieren, werden in Folge näher erläutert.

6.4.1 Städtetourismus

Tourismusaktivitäten in Städten (z. B. Sightseeing, Kongresstourismus, Kulturtourismus) haben eine relativ geringe Wettersensitivität (Fleischhacker und Formayer, 2007). Die Auswirkungen des Klimawandels auf den Städtetourismus müssen als indifferent bezeichnet werden, da wärmere Verhältnisse den Tourismus vor allem in den Übergangsjahreszeiten durchaus begünstigen, vermehrt auftretende Hitzewellen (vgl. Band 1, Kapitel 4) in den Sommermonaten sich dagegen potenziell negativ auswirken könnten (Allex et al., 2011). Lag die Anzahl der Hitzetage ($T_{max} \geq 30\,°C$) in Wien im Zeitraum 1976 bis 2005 noch bei rund 12 Tagen, so würde sich dies bei Verwendung des ECHAM5-Modells im A1B-Szenario im Zeitraum 2010 bis 2039 bereits auf 17 bis 20 Tage erhöhen, im Zeitraum 2036 bis 2065 gar auf 26 bis 29 Tage (Moshammer et al., 2006). Neben der Erhöhung der Sterblichkeitsrate (Abschnitt 6.1.1), könnte sich dies auch negativ auf den Tourismus auswirken.

Eine Befragung in Wien an Folgetagen eines heißen Tages zeigte allerdings, dass immerhin ein Drittel der Befragten ihr Programm aufgrund der Hitze geändert hat. Parks und Gastgärten wurden vermehrt aufgesucht, während bauliche Se-

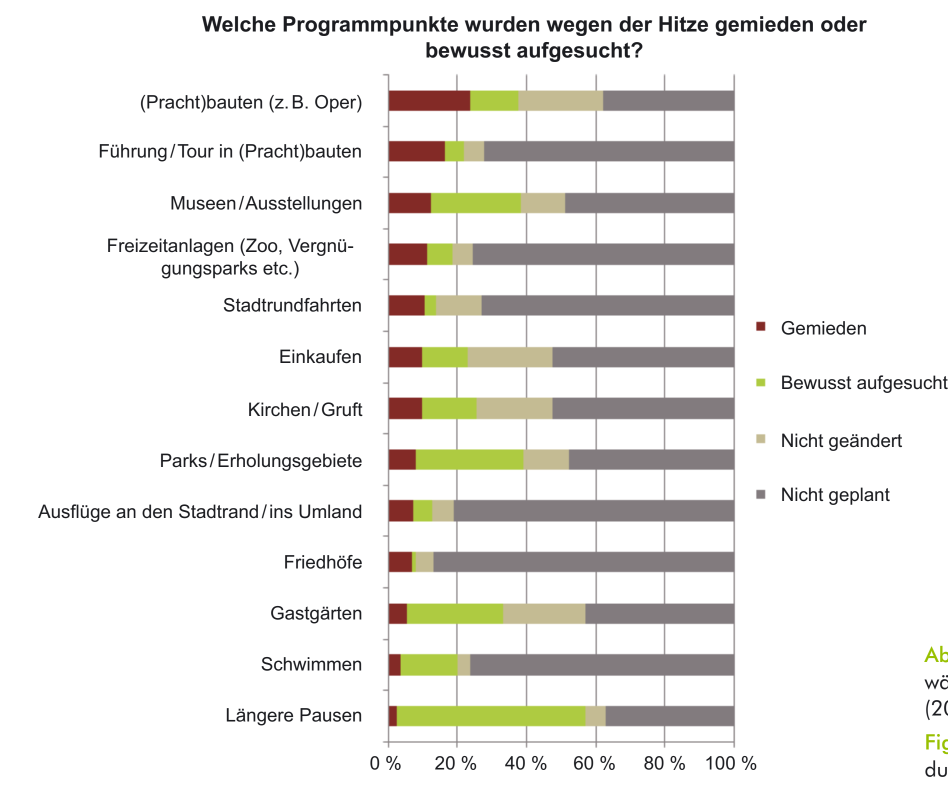


Abbildung 6.12 Attraktivität von Programmpunkten während einer Hitzewelle in Wien. Quelle: Allex et al. (2011)
Figure 6.12 Perceived attraction of points of interest during a heat wave in Vienna. Source: Allex et al. (2011)

henswürdigkeiten eher gemieden wurden (Abbildung 6.12). Eine negative Auswirkung der Hitzebelastung auf die Zufriedenheit und die touristische Nachfrage konnte nicht festgestellt werden (Allex et al., 2011).

6.4.2 Bade- und Erholungstourismus

Der Bade- und Erholungstourismus ist durch eine hohe Wettersensitivität geprägt, klimatische Änderungen haben also einen potenziell hohen Einfluss auf die touristische Nachfrage. So wurde für die Sommermonate ein eindeutiger Zusammenhang zwischen kühlen Tagen und unterdurchschnittlicher Nachfrage nachgewiesen. Der positive Einfluss von Schönwetter ist bei der Inlandsnachfrage stärker ausgeprägt, als bei der Auslandsnachfrage. Dies dürfte vor allem auf das spontanere Buchungsverhalten von Inlandsgästen zurückzuführen sein (Fleischhacker und Formayer, 2007).

Durch steigende Temperaturen sowie geringere Niederschlagshäufigkeit bestehen grundsätzlich Chancen für den Bade- und Erholungstourismus (Formayer und Kromp-Kolb, 2009a), allerdings könnten sich häufigere Niedrigwasserstände etwa im Donaubereich negativ auswirken (Fleischhacker und Formayer, 2007). Niedrigwasserstände an Seen scheinen von Urlaubenden nicht negativ aufgenommen zu werden (Pröbstl et al., 2007), Extremereignisse, bei denen die Zugänglichkeit des Sees nicht mehr ausreichend gegeben ist oder Wasserportarten nicht mehr ausgeübt werden können, könnten sich jedoch negativ auf die Nachfrage auswirken. Nur wenige aufeinander folgende Trockenjahre (vergleichbar mit 2003) würden z. B. ausreichen, um den Neusiedler See weitgehend auszutrocknen (Pröbstl et al., 2007). Die Wiederkehrwahrscheinlichkeiten von einem Pegelstand von 115,0 cm wie im Sommer 2003 lag in der Periode 1991 bis 2004 bei 1,4 %. Klimaprojektionen für 2020 und 2040 lassen diese Wiederkehrwahrscheinlichkeiten auf 5,8 bzw. 11,4 % ansteigen (Pröbstl et al., 2007).

6.4.3 Berg- / Alpiner Tourismus

Für den Bergtourismus sind mit Abstand die meisten Studien verfügbar. Dies liegt vor allem einerseits an der großen Bedeutung dieses Sektors in vielen alpinen Regionen und andererseits an den wenigen wirtschaftlichen Alternativen in diesen Regionen.

Sommertourismus

Für den alpinen Sommertourismus werden überwiegend positive Auswirkungen durch den Klimawandel erwartet, z. B. eine Wiederbelebung der Sommerfrische (Abegg und Steiger, 2011). Dies wird zum einen durch eine länger werdende Som-

mersaison und generell trockenere und wärmere Verhältnisse begründet, zum anderen wird angenommen, dass das Mittelmeer als derzeit wichtigste Sommerdestination in Europa aufgrund zunehmender Hitzewellen an Attraktivität einbüßen wird (Amelung und Viner, 2006; Ehmer und Heymann, 2008; UNWTO / UNEP, 2008) und die kühleren Alpen zum Teil als Ersatzdestination gewählt werden.

Während der Periode 1978 bis 2007 zeigte sich eine Zunahme der Zahl der Sommertage ($T_{max} \geq 25\,°C$) und der schwülen Tage, wohingegen die Anzahl der kühlen Tage ($T_{max} < 20\,°C$) zurückgegangen ist (Krajasits et al., 2008). Bei einer sehr wahrscheinlichen Fortsetzung dieses Trends (Matzarakis et al., 2007) könnten die früher schneefrei werdenden niedriger gelegenen Regionen im Frühjahr profitieren, höhergelegene Regionen hingegen eher im noch länger schneefreien Herbst (Krajasits et al., 2008).

Der überdurchschnittlich heiße Sommer 2003 hatte einen positiven Effekt auf den alpinen Sommertourismus. So stieg z. B. in der Schweiz die Anzahl an Tagesausflügen in ballungsnahe Bergregionen (OcCC, 2007). Serquet und Rebetez (2011) konnten einen deutlichen Zusammenhang zwischen hohen Temperaturen im Schweizer Flachland und dadurch steigenden Nächtigungen in Schweizer Bergdestinationen nachweisen. In Österreich lagen die Nächtigungen im Sommer 2003 um 1,8 % höher als der Durchschnitt der Jahre 2002 und 2004 (Fleischhacker und Formayer, 2007).

Neben den direkten Auswirkungen der Temperatur- und Niederschlagsänderungen, werden auch indirekte Auswirkungen auf den Tourismus erwartet. Hierbei werden Änderungen am Landschaftsbild (z. B. Gletscherrückzug, Anstieg der Baumgrenze) generell als negativ eingeschätzt, was den potenziell positiven direkten Effekten entgegen wirken könnte (Scott et al., 2007; Scott et al., 2008). Eine Zunahme von Naturgefahren (z. B. Steinschlag, Muren) ist aufgrund von auftauendem Permafrost und steigender Niederschlagsintensität wahrscheinlich (Behm et al., 2006; Lieb et al., 2010). Da Sicherheitsaspekte eine wichtige Rolle in der Wahrnehmung alpiner SommertouristInnen einnehmen, könnte sich eine Erhöhung des Gefährdungspotenzials auf alpinen Wegen negativ auf die touristische Nachfrage auswirken (Pröbstl und Damm, 2009). Bei einer Befragung von über 800 ÖsterreicherInnen gaben rund 30 % an, dass sie bei einer Abfolge von mehreren extrem heißen Sommern mit unattraktiven Bedingungen am Mittelmeer die heimischen Seen für einen Badeurlaub bevorzugen würden. Rund ein Sechstel würde statt Strand- / Badeurlaub einen Wander- / Bergurlaub machen (Fleischhacker et al., 2009).

Auch wenn eine Nachfragesteigerung im alpinen Sommertourismus aufgrund stabilerer und wärmerer Wetterverhältnisse plausibel erscheint, sei dennoch darauf hingewiesen, dass die Renaissance der Sommerfrische derzeit wissenschaftlich noch nicht nachgewiesen werden kann. Fundierte Schätzungen zum Nachfragepotenzial, das sich durch einen zu heißen Mittelmeerraum ergeben könnte, existieren ebenso wenig. Hierbei ist auch zu beachten, dass es sich um zwei grundlegend verschiedene touristische Produkte handelt, die zum Teil auch unterschiedliche Zielgruppen ansprechen (Abegg und Steiger, 2011).

Schnee-basierter Wintertourismus

Der Wintertourismus in Österreich, mit dem Hauptzweck Wintersport (Skifahren, Snowboarden, Langlaufen), ist in hohem Maße schneeabhängig. Ein direkter Zusammenhang zwischen Schneebedingungen und Übernachtungen konnte für österreichische Skidestinationen nachgewiesen werden (Falk, 2010; Töglhofer et al., 2011).

Die Auswirkungen des Klimawandels auf den schneebasierten Wintertourismus werden weltweit generell als negativ eingestuft (Scott, 2006). Im Alpenvergleich wurde die künftige natürliche Schneesicherheit österreichischer Skigebiete schlechter eingestuft, als die Frankreichs oder Italiens (Abegg et al., 2007), diese Studie berücksichtigt jedoch nur die Anzahl der betroffenen Skigebiete und nicht deren Transportkapazität, wie es nötig wäre um die Auswirkung auf die Nachfrage abschätzen zu können. Zudem bestehen aufgrund von Unterschieden in den klimatischen Verhältnissen, der Höhenlage der Skigebiete und der wirtschaftlichen Bedeutung des Wintertourismus auch innerhalb Österreichs große regionale Unterschiede in der Klimasensibilität. So ist zwar im Osten Österreichs früher mit negativen Folgen für die Skigebiete zu rechnen als im Westen, jedoch ist der gesamtwirtschaftliche Schaden dieser Entwicklung im Westen aufgrund der größeren Abhängigkeit von dieser Branche deutlich höher als im Osten (Breiling et al., 1997).

Hochgelegene Destinationen profitieren dagegen tendenziell in schneearmen Jahren. Jedoch wurde auch festgestellt, dass sich der Zusammenhang im Zeitraum 1972 / 73 bis 2006 / 07 abgeschwächt hat, was auf die Verbreitung der künstlichen Beschneiung zurückzuführen ist (Töglhofer et al., 2011). In vielen der bisherigen Studien wurde diese in der Folgenabschätzung für den Wintertourismus bisher nicht berücksichtigt. Bei einem Anteil beschneibarer Pistenflächen von knapp 60 % in der Saison 2012 / 13 (WKO, 2012) reicht eine alleinige Betrachtung der Naturschneeverhältnisse nicht aus.

Die konventionelle Beschneiungstechnologie ist auf ausreichend kühle Temperaturen angewiesen. Steigende Tempera-

turen bedeuten somit eine Verschlechterung der klimatischen Rahmenbedingungen. Diese können in Österreich in Regionen mit unterschiedlichen klimatischen Einflüssen (atlantisch, mediterran, kontinental) auch auf gleicher Seehöhe deutlich differieren (Prettenthaler et al., 2009b). Klimaprojektionen in Verbindung mit Beschneiungsmodellen zeigen, dass die derzeitige Beschneiungstechnologie Betriebsausfälle im Hochwinter bis 2025 (Periode 2011 bis 2040) weitgehend verhindern kann. Bis 2050 (Periode 2036 bis 2075) wären durch die zum Teil massiv steigenden Betriebsausfälle höhere Beschneiungsintensitäten und / oder andere, neue Technologien nötig (Formayer et al., 2011).

Für die Region Schladming konnte gezeigt werden, dass die sensibelste Höhenlage nicht zwangsläufig die Tallage sein muss, sondern – je nach lokalen klimatischen Verhältnissen – sich in mittleren Höhen im Bereich der Mittelstationen befinden kann. Gründe hierfür sind zum einen eine häufige Inversionslage, mit im Hochwinter höheren Temperaturen im Mittelstationsbereich als im Talbereich, und zum anderen die größere skitechnische Bedeutung der Abfahrten an die Mittelstation, ohne die das Skigebiet nicht durchgehend befahrbar wäre, wohingegen auf einzelne Talabfahrten in außergewöhnlich schneearmen Situationen auch verzichtet werden könnte (Formayer et al., 2009).

Analysen auf Bundeslandebene (Steiger und Abegg, 2011, 2013) zeigen unter Berücksichtigung gegenwärtiger Beschneiungstechnologie eine regional deutlich unterschiedliche Sensitivität der Skigebiete gegenüber klimatischen Änderungen (Abbildung 6.13).

Die übliche 100-Tage-Regel (Skibetrieb an mindestens 100 Tagen) ist in Ostösterreich schon ab einer Erwärmung von 1 °C im Vergleich zur Referenzperiode 1961 bis 1990 kaum mehr erfüllt. Nach Westen hin nimmt die Sensitivität ab. Jedoch wären bei einer Erwärmung von 2 °C nur mehr 64 % der österreichischen Skigebiete als schneesicher (100-Tage-Regel) zu bezeichnen, bei einer Erwärmung um 4 °C lediglich 16 % der Skigebiete. Die Schneeproduktion müsste zur Aufrechterhaltung einer 100-Tage-Saison im Österreichschnitt bei +2 °C um 113 % und bei +4 °C um 425 % gesteigert werden (Steiger und Abegg, 2011). Derartige Steigerungen werden für eine Vielzahl der Skigebiete ökonomisch nicht tragbar sein, ganz abgesehen von ökologischen Aspekten und der dazu notwen-

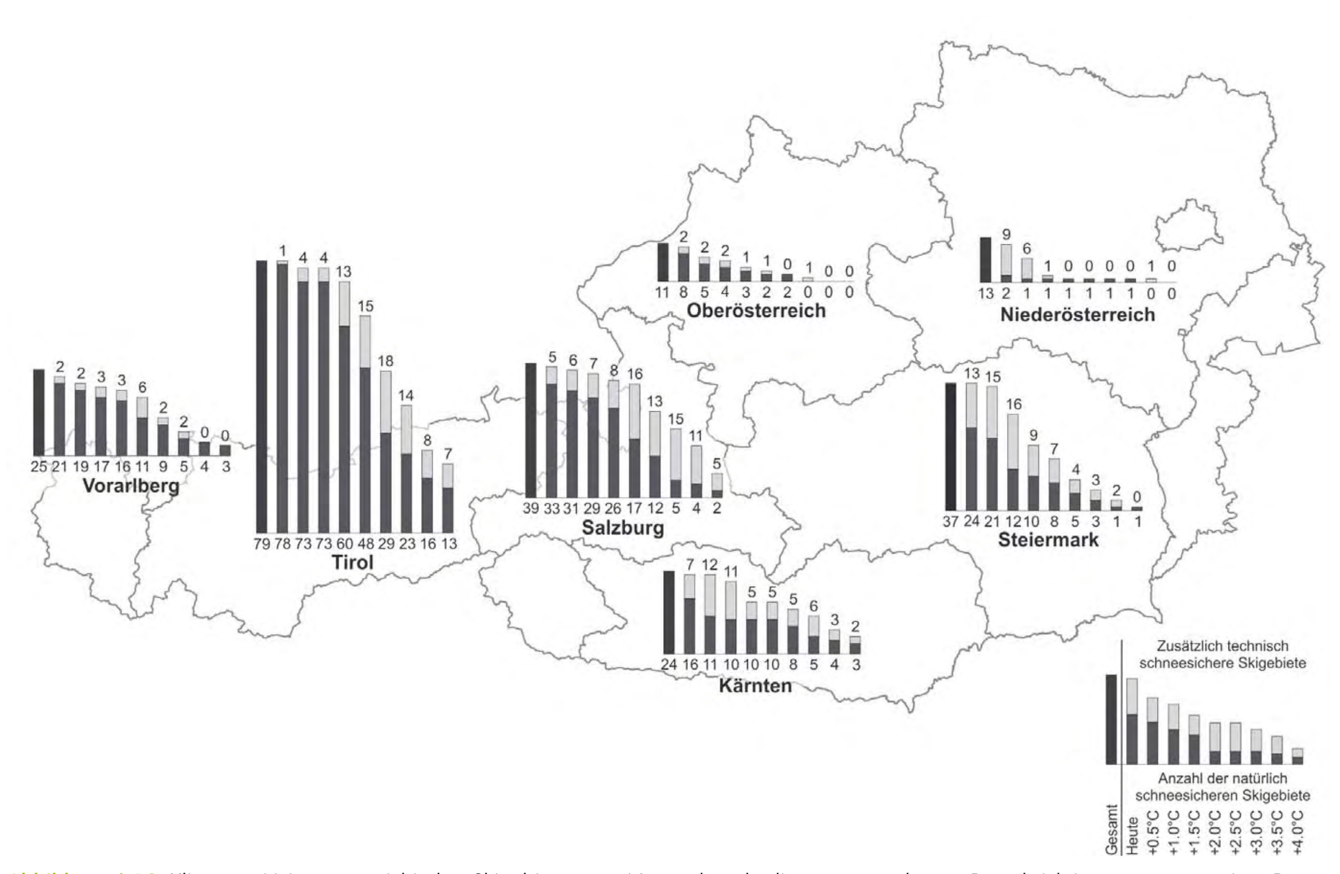


Abbildung 6.13 Klimasensitivität österreichischer Skigebiete unter Naturschneebedingungen und unter Berücksichtigung gegenwärtiger Beschneiungstechnologie. Quelle: Steiger und Abegg (2011)

Figure 6.13 Climate sensitivity of ski areas in Austria with and without current snowmaking technology. Source: Steiger und Abegg (2011)

digen Infrastruktur sowie des Energie- und Wasserverbrauchs. Die Sensitivität von Skigebieten kann aufgrund unterschiedlicher klimatischer Bedingungen und Höhenlagen der Skigebiete auch innerhalb eines Bundeslandes sehr unterschiedlich sein. So wurden für Tirol im Rahmen einer Modellierung auf Skigebietsebene das Tannheimer Tal, der Raum Kitzbühel, sowie die Region Innsbruck als besonders früh betroffen identifiziert, wohingegen die meisten stark vom Wintertourismus abhängigen Täler (z. B. Ötztal, Zillertal) erst gegen Mitte bzw. Ende des Jahrhunderts mit größeren Einschränkungen zu rechnen haben (Steiger und Stötter, 2013).

Bei allen derartigen Modellierungen ist jedoch zu beachten, dass gewisse Unsicherheiten bestehen. Zur Einschätzung klimamodellbedingter Unsicherheiten sei auf Band 1, Kapitel 4 verwiesen. Es bestehen jedoch noch weitere Unsicherheiten, die aufgrund der nachgeschalteten Modelle (z. B. Schneemodell) und Annahmen auftreten. Die präsentierten Ergebnisse sind somit als valide Trendabschätzungen zu interpretieren. Für konkretere Aussagen bedarf es einer präzisen Anpassung der Modelle und Annahmen an den Anwendungszweck, z. B. der Rentabilitätsrechnung einer Beschneiungsanlage.

Neben den angebotsseitigen Veränderungen sind jedoch auch mögliche klimabedingte Veränderungen bei der Nachfrage zu beachten. Die Schneesicherheit ist bei der Wahl des Skigebiets das wichtigste Entscheidungskriterium. Befragungen in Österreich ergaben, dass rund ein Viertel der Befragten bei unsicheren Schneeverhältnissen auf einen Skiurlaub verzichten würde (Fleischhacker et al., 2009; Unbehaun et al., 2008). Hinzu kommt wohl auch das Wintererlebnis, welches bei vielen zu einem Skiurlaub dazugehört. Weiße Kunstschneebänder zwischen aperen Wiesen werden für viele, die auch der Winterlandschaft wegen kommen, keine ausreichende Attraktivität für einen Besuch bieten.

Die Bereitschaft zur Aufgabe der Loyalität zu einer Destination zugunsten einer Destination mit besseren Schneeverhältnissen ist sehr hoch (Unbehaun et al., 2008). Ebenso gaben die Befragten an, dass sie in schneearmen Wintern weniger Ski fahren würden (Luthe, 2009; Unbehaun et al., 2008). Eine Befragung unter LangläuferInnen in Österreich ergab, dass rund 20 % den Sport bei ungenügenden Verhältnissen eher nicht ausüben würden, als auf internationale Destinationen oder Indoor-Angebote auszuweichen (Landauer und Pröbstl, 2008). So war im äußerst warmen und schneearmen Winter 2006/07 (rund +3 °C über dem langjährigen Mittelwert) in Tirol bei den Seilbahnen ein Umsatzrückgang von rund 7 % zu verzeichnen. Die Bandbreite der Änderungen war je nach Größe und Höhenlage des Skigebiets unterschiedlich: kleine Skigebiete (Förderkapazität < 5 000 P/h) hatten im Mittel Umsatzeinbußen von 39 % zu verzeichnen. Auch höher gelegene kleine Skigebiete mussten Umsatzeinbußen hinnehmen. Skigebiete aller Größenklassen mit einer mittleren Höhe unter 1 500 m hatten Einbußen von 22 % (Steiger, 2011).

Unter Annahme eines österreichweiten Nächtigungsrückgangs von 10 % aufgrund von Schneemangel, werden die Bruttowertschöpfungsverluste auf 32 Mrd. € geschätzt (Prettenthaler et al., 2009b). Hierbei wären industriegeprägte Bundesländer (z. B. Ober- und Niederösterreich) in Relation zu den Tourismusbundesländern stärker betroffen, da die Tourismuswirtschaft vor allem aus der Lebensmittelindustrie, dem Handel und dem Bauwesen Vorleistungen aus diesen Bundesländern beziehen (Prettenthaler und Formayer, 2011).

6.4.4 Forschungsbedarf

Für angebotsseitig zu erwartende Veränderungen (Schneeverfügbarkeit, Niedrigwasser etc.) sind ausreichend gut entwickelte Modelle verfügbar, welche sowohl auf gröberer räumlicher Skala, sowie für einzelne konkrete Fallbeispiele valide Ergebnisse liefern können. Eine Anwendung bestehender Modelle bzw. Modellketten in bisher noch nicht untersuchten Regionen ist anzustreben. Forschungsbedarf besteht hier vor allem in der Integration von betriebs- und volkswirtschaftlichen Fragestellungen, was jedoch die Kooperation mit Wirtschaftsbetrieben voraussetzt.

Bei der Nachfrageseite bestehen noch weitaus größere Wissenslücken. Wie groß ist das Potenzial an TouristInnen, die aufgrund eines zu heiß empfundenen Mittelmeerraums auf österreichische Destinationen ausweichen? Welche Bedeutung hat zeitliche (gleicher Urlaubstyp, gleiche Destination in anderer Jahreszeit/Monat) und räumliche Substitution (gleicher Urlaubstyp, andere Destination) bei sich ändernden klimatischen Bedingungen? Wie viel an Klimasignal ist nötig, damit spürbare Veränderungen bei der Wahl des Urlaubstyps (Strandurlaub versus Aktiv-Bergurlaub) ausgelöst werden? Grundsätzlich sind auch weitere externe Faktoren, die das Tourismussystem beeinflussen, mit zu berücksichtigen, da sich diese Faktoren gegenseitig verstärken oder auch abschwächen können. So wurden z. B. die Folgen des demographischen Wandels im Quellmarkt Deutschland für den Skitourismus in Tirol bis zur Mitte des Jahrhunderts als bedeutender eingestuft als der Klimawandel (Steiger, 2012). Eine integrative, interdisziplinäre Betrachtung der Klimawandelfolgen für den Tourismus, sowie eine Kontextualisierung mit anderen Treibern ist die große Herausforderung für die Forschung der kommenden Jahre.

6.5 Extremereignisse, Naturgefahrenpotenzial und Risikotransfer
6.5 Extreme events, natural hazards and risk transfer

Naturgefahrenrisiken (vgl. auch Band 2, Kapitel 1 für Risikodefinitionen) sind ein Produkt der naturräumlichen Komponente der Gefahr („hazard“) und der sozioökonomischen Komponenten der Risikoelemente („elements at risk“) sowie der entsprechenden Vulnerabilität („vulnerability“) von exponierten Objekten. Inwieweit sich klimabedingte Änderungen auf das Sachschadenrisiko auswirken, ist somit in der systematischen Betrachtung dieser Risikokomponenten zu sehen. Zunehmende Schäden sind noch kein zuverlässiger Indikator für den (wachsenden) Einfluss des Klimawandels – hier ist die sozio-ökonomische Entwicklung im Betrachtungszeitraum zu berücksichtigen. Für die meisten siedlungsrelevanten Naturgefahrenprozesse sind Aussagen bezüglich klimatisch bedingter Veränderungen insgesamt noch sehr unsicher, die projizierten sozio-ökonomischen Änderungen mit einem weiter zunehmenden Flächendruck und der damit einhergehenden Wertekonzentration lassen schließen, dass ohne verstärkte Anpassungsmaßnahmen naturgefahreninduzierte Schäden in Zukunft noch weiter zunehmen werden. In den folgenden Ausführungen wird aus Platzgründen nicht näher auf einzelne Sektoren, wie z. B. Land- / Forstwirtschaft oder Tourismus, eingegangen, jedoch sind bei den Gefahrenpotenzialen sowohl die Personenrisiken insgesamt (inkl. Touristen) sowie die Schadensrisiken insgesamt (inkl. der Bestand in der LW / FW) inkludiert.

6.5.1 Sachschäden aus Naturgefahren und Risikotransfer

Die naturgefahreninduzierte Schadensentwicklung der Vergangenheit und zukünftig zu erwartende Schadensbilder sind nicht primär und ausschließlich auf naturraumbedingte Veränderungen der Prozessdynamik zurückzuführen. Sie stellen vielmehr ein komplexes Wechselspiel, eine Interaktion der Mensch-Umwelt-Beziehung, dar. Diese Mensch-Umwelt-Interaktion spiegelt sich auch in der methodischen Fundierung von Risikoanalysen wider. Hierbei wird das Sachschadenrisiko als ein Produkt aus der Gefahr, der Risikoelemente und der Vulnerabilität aufgefasst. Speziell in Österreich ist davon auszugehen, dass der sozioökonomische Strukturwandel und die Änderung von Rechtsnormen (Raumordnung, Baunormen etc.) einen wesentlich größeren Einfluss auf zu erwartende Schadensentwicklungen haben werden, als klimawandelbedingte, veränderte Frequenz-Magnitude-Beziehungen von Prozessen bzw. neu entstehende Prozessräume.

Ein wichtiger Aspekt in Bezug auf Prognosen zukünftiger Risikosituationen betrifft das Maßnahmenspektrum des staatlichen Naturgefahrenmanagements. In Österreich betrifft dies vor allem die Prävention über entsprechende Rechtsnormen des Flächen- oder Objektschutzes (Baunormen und Raumordnung) sowie Schutzmaßnahmen im Wirkungsbereich der Schutzwasserwirtschaft bzw. der Wildbach- und Lawinenverbauung. Technische Schutzmaßnahmen besitzen dabei einen dualen Charakter: sie (a) erfüllen eine Schutzwirkung für andere Objekte und (b) stellen gleichzeitig ein nicht zu vernachlässigendes Schadenpotenzial dar.

Technische Schutzmaßnahmen sind für ein definiertes Schutzziel (angestrebtes Sicherheitsniveau) ausgelegt, für darüber hinausgehende Prozessintensitäten kann die (volle) Schutzwirkung nicht angenommen werden (Restrisiko). Dies kann auch, in Kombination mit einer entsprechenden Bautätigkeit nach Errichtung und im unmittelbaren Wirkungsbereich einer Maßnahme, zu Schäden führen, die ohne die Maßnahme und unmittelbaren Bautätigkeiten nicht entstanden wären. Auch kann ein Versagen von Schutzmaßnahmen mit den dazugehörigen Konsequenzen nicht ausgeschlossen werden. Bei der Umsetzung von Schutzmaßnahmen wird lokal das entsprechende Bemessungsereignis definiert. Dies entspricht dem Kenntnisstand zum Zeitpunkt der Projektierung (regionale und lokale Statistik, Erfahrungswerte, Gutachten) und unterliegt einer stetigen Dynamik. Zur Aufrechterhaltung der Schutzwirkung sind heute schon beachtliche Budgetmittel zu veranschlagen und es muss davon ausgegangen werden, dass die Mittelverteilung zugunsten der Erhaltung von bestehenden Maßnahmen und für das Ergreifen von weiteren Maßnahmen weiter zunehmen wird. Hier wird davon ausgegangen, dass die Schutzwirkung von bestehenden Maßnahmen auch in Zukunft uneingeschränkt bestehen wird und Schutzmaßnahmen an vorrangigen Orten auch weiter umgesetzt werden.

Die hier diskutierten Erkenntnisse aus der Vergangenheit und nach heutigen Kenntnisstand zu erwartenden Szenarien für die nähere und mittelfristige Zukunft beziehen sich ausschließlich auf Österreich bzw. auf den Ostalpenraum und können nicht weiter, in einem räumlichen Sinne, verallgemeinert werden. Der Fokus der Aussagen liegt dabei auf naturgefahreninduzierten Sachschäden, dies sind im Wesentlichen Gebäude- und Inventarschäden (private und öffentliche Objekte, sowie Gewerbe- und Industrieobjekte).

Die immanenten Unsicherheiten, die der „ungewissen Zukunft“ unterliegen, sind nicht nur in Bezug auf Klimaprojektionen und dadurch potenziell veränderte Prozessdynamiken zu

sehen, sondern betreffen auch in einem hohen Maße den sozioökonomischen Strukturwandel und die darauf abzielenden Prognosen und Szenarien (siehe z. B. Bevölkerungsprognosen für Österreich aus 1999 in Tazi-Preve et al., 1999 und heutige Situation). Neben der anteiligen Verschiebung innerhalb der einzelnen Wirtschaftssektoren und damit einhergehenden veränderten Arbeitsplatzsituationen und Einkommensverhältnissen sowie einer veränderten, dem stetigen Wandel unterliegenden Lebensweise („lifestyle") betrifft dies vor allem den demographischen Wandel sowie regionale Bevölkerungsveränderungen. In diesem Zusammenhang können Bevölkerungsentwicklungen und -konzentrationen als Beispiel für den sozioökonomischen Strukturwandel oder zumindest für die Dynamik in Bezug auf das Schadenspotenzial herangezogen werden.

6.5.2 Aktuelle Risikosituation und Schadensbilder der Vergangenheit

Für Österreich liegt keine konsistente Zusammenstellung der Naturgefahrenschäden aus der Vergangenheit in entsprechend zeitlicher und räumlicher Auflösung vor. Einzelne Ereignisse in der jüngeren Vergangenheit (z. B. Lawinenereignis in Galtür 1999, Hochwasserereignisse 2002 und 2005) sind gut aufgearbeitet, analysiert und dokumentiert. Eine systematische Analyse aller naturgefahreninduzierten Schadensereignisse (häufige bis sehr seltene), z. B. anhand von Daten von Versicherungen, des Katastrophenfonds oder des Finanzministeriums über die Einkommenssteuer, ist bisher noch nicht vorhanden. Demgegenüber wurden teilweise prozesssektorale Analysen (z. B. Wildbachereignisse zwischen 1972 und 2004 oder zu Sturmereignissen) durchgeführt (Oberndorfer et al., 2007; Prettenthaler et al., 2012). Prettenthaler et al. (2009a) zeigen durch eine Auswertung der Auszahlungen aus dem Katastrophenfonds an die Länder für Schäden im Vermögen Privater zwischen 1966 und 2006 auf, dass die absoluten Auszahlungen – und somit die entstandenen Schäden durch vom Katastrophenfonds gedeckten Ereignisse – offensichtlich, mit Ausnahme des Ereignisses von 2002, nicht signifikant zugenommen haben (bis 1985 refundierte der Katastrophenfonds einen Anteil von 50 % an die Länder, ab 1985 einen Anteil von 60 %). Berücksichtigt man bei einer Normierung der Auszahlungen die Entwicklung des Gebäudestands (wie in Abbildung 6.14 dargestellt), so kann man die positive normierte Entwicklung argumentatorisch auf den positiven Effekt von Schutzmaßnahmen zurückführen.

Qualitativ-deskriptive Experteneinschätzungen oder regionale Risikoanalysen bedienen sich immer aus Erkenntnissen der Vergangenheit, schließen daraus auf die Zukunft und

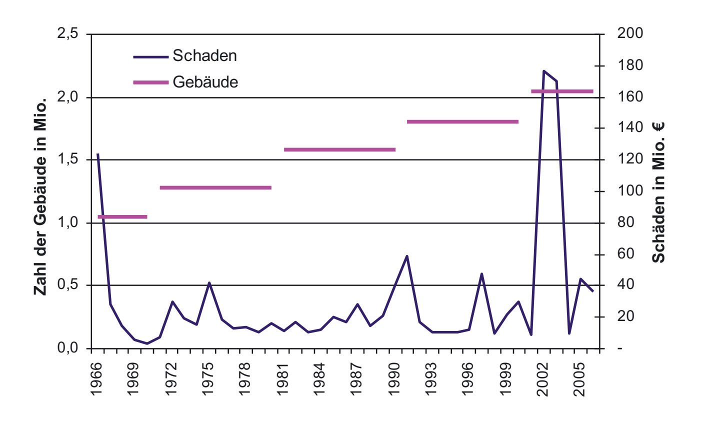


Abbildung 6.14 Zahlungen aus dem Katastrophenfonds an die Länder für Schäden im Vermögen Privater (in Mio. € Baukostenindex angepasst) inkl. Niveau des Gebäudebestands. Quelle: Prettenthaler et al. (2009a)

Figure 6.14 Payments from the disaster fund to the states for damages in private assets (in million € construction cost index adjusted) including level of the building stock. Source: Prettenthaler et al. (2009a)

können somit einen ersten guten Überblick geben. Derartige Arbeiten verfolgen immer eine spezifische Fragestellung und können nicht direkt miteinander vergleichen werden. Klassischerweise konzentrieren sich viele Arbeiten in Österreich auf alpine Naturgefahren, womit gewisse Gefahrenprozesse mit einem hohen Risikopotenzial, wie z. B. Erdbeben, Hagel oder Sturm, nicht berücksichtigt werden. Weitere technische und von Menschen direkt ausgelöste Gefahrenlagen werden bisher nicht systematisch und in Kombination mit Naturgefahrenrisiken berücksichtigt (wie etwa in der EU-Richtlinie „Risk Assessment and Mapping Guidelines for Disaster Management", EK, 2010, gefordert). Mit Fokus auf alpine Naturgefahren können nach Rudolf-Miklau et al. (2009) die in Tabelle 6.1 angeführten Risiko- und Katastrophenpotenziale für Österreich gewichtet aufgelistet werden, wobei das größte Katastrophenpotenzial den Hochwasserereignissen zuzuschreiben ist.

Eine szenariobasierte Untersuchung des kumulativen Schadensrisikos von Extremereignissen in Tirol mit einem Fokus auf Großschadensereignisse ermittelte folgende absteigende Reihung des Naturgefahrenrisikos (Huttenlau et al., 2010; Huttenlau und Stötter, 2012):

1. Erdbeben
2. Hochwasser
3. Hagel
4. Bergsturzereignisse inkl. Kaskadeneffekte (Rückstau, Dammbruch, Flutwelle)
5. Sturm

Tabelle 6.1 Risiko- und Katastrophenpotenzial alpiner Naturgefahren in Österreich. Nach Rudolf-Miklau et al. (2009)
Table 6.1 Potential of risks and catastrophies of alpine natural hazards in Austria. Adapted from Rudolf-Miklau et al. (2009)

Prozessart	Personenrisiko	Schadenrisiko	Katastrophenpotenzial
Hochwasser	Mittel	Sehr hoch	Sehr hoch
Lawine	Sehr hoch	Mittel	Hoch
Mure	Hoch	Mittel	Mittel
Spontane Rutschung	Hoch	Mittel	Mittel
Permanente Rutschung	gering	Mittel	Mittel
Fels- und Bergsturz	Hoch	Mittel	Mittel
Steinschlag	Sehr hoch	Gering	Gering

Kortschak et al. (2009) berechnen im Rahmen einer Hochwasserrisiko-Abschätzung für Österreich den Gesamtschaden bei gegebenen Jährlichkeiten sowie den mittleren jährlichen Schadenerwartungswert auf Basis von einer Million Realisationen des Gesamtschadens. Neben einer Copula-Methode wird auch die von Url (2008) implementierte Distanzmatrix-Methode durchgeführt (hier sollen nur die Ergebnisse der angewandten Standardmodelle erwähnt werden, für weitere Auswertungen mit Modellmodifikationen wird auf die entsprechende Publikation verwiesen). Die Gesamtschäden bei gegebenen Wiederkehrperioden (T=) werden von den beiden Methoden (Distanzmatrix / Copula) wie folgt berechnet: T=100 mit 1 059 / 2 355 Mio. €, T=200 mit 1 345 / 3 351 Mio. €, T=300 mit 1 547 / 3 917 Mio. € und T=1 000 mit 2 405 / 5 604 Mio. €. Der jährliche Schadenerwartungswert wird mit 112,4 / 150,2 Mio. € angegeben. Prettenthaler et al. (2012) wenden bei der Sturmschadensgefährdung für Österreich zwei unterschiedliche Modelle (Methode 1 / Methode 2) an. Die Schadenserwartung wird für unterschiedliche Wiederkehrperioden (T=) wie folgt berechnet: T=50 mit 408 / 643 Mio. €, T=100 mit 613 / 1 050 Mio. €, T=200 mit 917 / 1 711 Mio. € und T=250 mit 1 047 / 2 009 Mio. €. Ebenfalls führten Rainer und Deepen (2012) von Aon Benfield Modellierungen mit probabilistischen Marktmodellen der Rückversicherungsbranche durch und zeigten eine große Spannweite der Ergebnisse bei T=10 zwischen 39 und 191 Mio. € oder bei T=200 zwischen 969 und 1 397 Mio. €. Die Analyse der Autoren mit einem stochastischen Modell ergaben folgenden Gesamtschäden: bei T=50 von 310 Mio. €, bei T=100 von 370 Mio. €, bei T=200 von 433 Mio. € und bei T=1 000 von 584 Mio. €. Der jährliche Schadenerwartungswert wird mit 133 Mio. € berechnet, worst-case-Szenarien führen zu Schadenssummen von ca. 1 500 Mio €. Hofherr und Miesen (2012) von der Munich Re berechneten versicherte Sturm-Marktschäden: für T=50 von 360 Mio. €, für T=100 von 550 Mio. €, für T=500 von 1 300 Mio. € und für T=1 000 von 1 700 Mio. €; der jährliche Schadenerwartungswert wird mit 102 Mio. € angegeben.

In der benachbarten Schweiz, mit einer ähnlich einzuschätzenden Risikosituation wie in Österreich (mit Ausnahme von möglichen Störfällen in Kernkraftwerken), kam die „Katarisk – Katastrophen und Notlagen in der Schweiz"-Studie des Bevölkerungsschutzes 2003 generell zur Erkenntnis, dass sich das jährliche monetarisierte Risiko, inklusive Aversion, aus ca. 50 % Alltagsereignissen (Ereignisse, die geringen Schäden verursachen) und aus ca. 50 % Katastrophen- und Notlagen (Ereignisse, deren Schäden Alltagsereignisse übersteigen) zusammen setzt (BABS, 2003). Naturgefahrenereignisse machen hierbei einen Bruchteil des Risikos an Alltagsereignissen aus (2 % des Gesamtrisikos), wohingegen Naturgefahrenereignisse im Bereich der Katastrophen- und Notlagen einen Großteil zum Risiko beitragen (33 % Naturgefahren, 13 % Epidemien, 3 % Störfälle in Kernkraftwerken und 1 % Migration). Ohne Berücksichtigung der Aversion schwindet der Anteil der Risiken infolge von Katastrophen- und Notlagen auf 6 % der Gesamtrisiken, Alltagsrisiken machen dann 94 % des monetarisierten Risikos aus, wobei davon 5 % Naturgefahrenereignissen zuzuordnen sind. Hinsichtlich des jährlichen Schadenserwartungswertes von Sachschäden infolge von Katastrophen- und Notlagen inklusive Aversion (50 % des Jahresgesamtrisikos) kommt die Studie zur folgenden Reihung:

1. Erdbeben 17 %
2. Epidemie 13 %
3. Hochwasser 5 %
4. Kältewelle 3 %
5. Trockenheit / Hitzewelle 3 %
6. KKW-Störfall 3 %
7. Gewitter / Hagel 2 %
8. Sturm 2 %

9. Lawine 1 %
10. Migration 1 %

Zur Betrachtung der europäischen wie auch der globalen Ebene können Datenbanken für einen Überblick herangezogen werden: z. B. The International Disaster Database (CRED, 2009), European Severe Weather Database (ESSL, 2013) oder NATHAN, Globe of Natural Hazards (Munich Re, 2013). Diese Datenbanken führen vor allem großflächige länderspezifische Katastrophenereignisse mit sehr hohen Schadenssummen und / oder Todesopfern. Kleinräumige Ereignisse, die nicht als große Katastrophe eingeschätzt werden, werden nicht berücksichtigt. Eine Auswertung der EM-DAT für Österreich (Tabelle 6.2) reiht die zehn größten Schadensereignisse (nach Schadenssummen) zwischen 1990 und 2012 auf. Eine prozessspezifische Zusammenfassung für denselben Betrachtungszeitraum ist in Tabelle 6.3 dargestellt. In diesen beiden Auflistungen ist das Hochwasserereignis vom Juni 2013 noch nicht berücksichtigt. Das österreichische Innenministerium meldete laut Bundekanzleramt im August 2013 verursachte Gesamtschäden von 900 Mio. € an den Solidaritätsfond der EU (BKA, 2013).

Neben den frei zugänglichen Datenbanken gibt es weitere, deutlich besser aufgelöste, nicht frei zugängliche Datenbanken, etwa jene des NatCat-Services der Munich Re. Die Datenbanken sind untereinander allerdings nicht konsistent, da die Inhalte auf unterschiedlichen Meldungen und Beobachtungen beruhen. Die Analysewerte weichen teilweise deutlich voneinander ab (Gall et al., 2009) und Einzelereignisse werden in internationalen Datenbanken oft überschätzt (Pfurtscheller et al., 2011). Allgemein ist aus den Datenbanken ein klarer Trend hin zu steigenden Schadenszahlen und -summen ableitbar (z. B. jährlich erscheinende Schadenspiegel der Munich Re auf Basis der NatCat-Datenbank mit den bekannten Grafiken, Munich Re, 2013). Der Trend zu global steigenden Schäden lässt sich wie folgt erklären:

- Globaler Wandel in den Umweltbedingungen (vor allem Landnutzung) und die Auswirkungen auf das Prozessgeschehen
- Steigende (Welt-)Bevölkerung und damit Zunahme von Besitz
- Veränderungen des Lebensstandards und der Lebensqualität mit steigenden Vermögenswerten
- Veränderungen in der Wirtschaftsweise und der Arbeits (-platz)struktur
- Mögliche hohe Schäden auf kleinem Raum durch Bevölkerungs- und Wertekonzentration in Agglomerationen

Tabelle 6.2 Auszug der 10 schadensträchtigsten Katastrophenereignisse in Österreich aus der EM-DAT. Quelle: EM-DAT[1]

Table 6.2 Extract of EM-DAT – The 10 most destructive catastrophic events in Austria. Source: EM-DAT6[1]

Ereignis	Datum	Schaden in Millionen USD
Hochwasser	12.08.2002	2 400
Hochwasser	21.08.2005	700
Sturm	29.02.2008	500
Sturm	23.07.2009	500
Sturm	17.01.2007	400
Hitzewelle	Juli 2003	280
Hochwasser	22.06.2009	200
Hochwasser	08.07.1997	175
Sturm	25.02.1990	120
Sturm	28.02.1990	120

[1] http://www.emdat.be/database. (CRED, 2009)

- Siedlungsentwicklung sowie Gewerbe- und Industrieansiedlung in exponierten Gebieten
- Steigende Vulnerabilität moderner, spezialisierter sowie kulturell und sozial diversifizierter Gesellschaften und Technologien
- Erhöhte Versicherungsdurchdringung mit entsprechenden Haftungsverpflichtungen bei steigenden Versicherungsschäden

6.5.3 Bevölkerungsentwicklung als Indikator für den Schadenspotenzialanstieg

Räumlich und zeitlich aufgelöste Bevölkerungs- und Gebäudedaten (Statistiken der historischen Entwicklung und Projektionen) können als aufschlussreiche Indikatoren zur Schadenspotenzialentwicklung herangezogen werden und stellen somit auch mit einer gewissen Unschärfe Entwicklungspfade des Naturgefahren-Risikos dar.

Die Bevölkerungsentwicklung vom 20. Jahrhundert bis 2001 zeigt deutliche räumliche Disparitäten der relativen Veränderung zwischen Gebieten mit Abwanderung und Gebieten mit starker Zuwanderung. Die urbanen Räume sowie die zentralen Alpentäler zeigen hierbei eine deutliche Bevölkerungszunahme, wohingegen die Bevölkerungszahlen in ländlichen Räumen und peripheren Alpentälern abnehmen. Dieser Trend setzt sich seit 2001 (2001 bis 2010) verstärkt fort, wobei fast alle Alpentäler (Ausnahme Nordtirol allgemein und Lienz in Osttirol) und ländlichen Gebiete entlang

Tabelle 6.3 Zusammenstellung der Katastrophenereignisse der EM-DAT für Österreich, differenziert nach Prozessarten. Quelle: EM-DAT
Table 6.3 Summary of catastrophic events for Austria differentiated according to process types. Source: EM-DAT

	Anzahl Ereignisse	Tote	Betroffene	Schaden in Mio. USD
Erdbeben	1	-	-	-
Kältewelle	2	7	-	-
Hitzewelle	2	350	-	280
Hochwasser	15	39	61 416	3 594
Lawinen	6	315	10 380	52
Massenbewegung	2	43	-	-
Stürme	17	22	300	1 706

und südlich des Alpenhauptkamms sowie das nördliche Niederösterreich von einer negativen Bevölkerungsentwicklung betroffen sind. Dahingegen nimmt die Bevölkerung in den Ballungszentren (Landeshauptstädte und Bundeshauptstadt) mit ihrem Umland, entlang der Entwicklungsachse Salzburg-Wien sowie in vielen attraktiven (Fremdenverkehrs-)Gebieten Tirols und Vorarlbergs mit Ausnahme deutlich peripherer Gebiete zu.

Insgesamt stieg die Gesamtbevölkerung von 4,5 Mio. im Jahr 1869 auf 8,45 Mio. zum Stichtag 1.1.2013, wobei absehbar ist, dass auch kurz- bis mittelfristig mit einem weiteren Wachstum durch Zuzug zu rechnen sein wird. Für Tirol zeigt Stötter (2007) exemplarisch auf, wie intensiv sich seit 1951 die Kulturlandschaft und somit auch das (permanente und temporäre) Schadenspotenzial verändert haben. Zusätzlich zur wachsenden Bevölkerung trägt auch der Tourismus zu einem steigenden Schadenspotenzial bei (z. B. durch Gebäude und temporär stark steigende Anzahl der anwesenden Personen). Die potenzielle Bevölkerung als Summe von Wohnbevölkerung und Gästebetten stieg – mit Ausnahme von zwei Gemeinden – im Mittel um den Faktor 2,4, die Zahl der Wohngebäude um den Faktor 5,1 und die Zahl der Beherbergungsbetriebe um den Faktor 6,1. Prettenthaler (2010) zeigt diese Entwicklung recht deutlich anhand der generellen Zunahme von Gebäudewerten (versicherte Summen von Wohngebäuden) zwischen 1990 und 2007 im Bereich des 100-jährlichen Hochwassergefährdungsbereiches (siehe Abbildung 6.15).

Die Szenarien der Raumentwicklung Österreichs 2030 der Österreichischen Raumordnungskonferenz (ÖROK) zeigen unterschiedliche räumliche Trends für vier Zukunftsszenarien: „Alles Wachstum", „Alles Wettbewerb", „Alles Sicherheit" und „Alles Risiko". (ÖROK, 2008, 2009). Unabhängig von möglichen Klima-induzierten Veränderungen kann durch den deutlichen Anstieg der bebauten Fläche – und dadurch der steigenden materiellen Werte – ein erhöhtes Schadenspotenzial abgeleitet werden. Dies steht nicht im Widerspruch zu den vorherigen Aussagen mit Bezug zur Entwicklung der Auszahlungen aus dem Katastrophenfond zwischen 1966 und 2006, da davon ausgegangen wird, dass in den vergangenen Jahrzehnten vorrangig Schutzmaßnahmen des Flächenschutzes mit hoher Priorität getätigt wurden.

Die regionalisierten Prognosen der Bevölkerungs-, Erwerbstätigen- und Haushaltsentwicklung bis 2030 – mit einem Ausblick bis 2050 – (ÖROK, 2011) liefern weitere wichtige Erkenntnisse zur Abschätzung des zukünftigen Schadenspotenzials möglicher klimainduzierter Veränderungen des Naturgefahrenrisikos. Nach dem Hauptszenario nimmt die Bevölkerungszahl weiter zu und wird von rund 8,3 Mio. bis zum Jahr 2030 auf etwa 9 Mio., bis 2050 auf etwa 9,5 Mio. ansteigen. Die Zahl der Haushalte wird von heute etwa 3,6 Mio. auf über 4 Mio. (2030) bzw. 4,3 Mio. (2050) ansteigen, was sich in einem höheren Wohnungsbedarf und wachsenden materiellen Werte(-konzentrationen) ausdrücken wird.

Es ist mit weiterem Zuzug in die Städte und deren Umland sowie mit Bevölkerungszunahme in weiten Teilen der Alpentäler nördlich des Alpenhauptkammes und mit Abwanderung aus ländlichen, peripheren, wirtschaftsschwachen Gebieten zu rechnen. Die Zahl der Privathaushalte wird durch die Zunahme von Einpersonen- sowie von AlleinerzieherInnen-Haushalten in fast allen Gebieten ansteigen. Die Zunahme der Werte und deren Konzentration wird auch dazu führen, dass Ereignisse bei gleicher Intensität und identem Ort in Zukunft zu deutlich höheren Schadenssummen führen können.

6.5.4 Klimawandel und Naturgefahrenschäden

Um aus den bisher aufgeführten Punkten des Abschnitts 6.5 potenzielle Implikationen für zukünftige naturgefahrenindu-

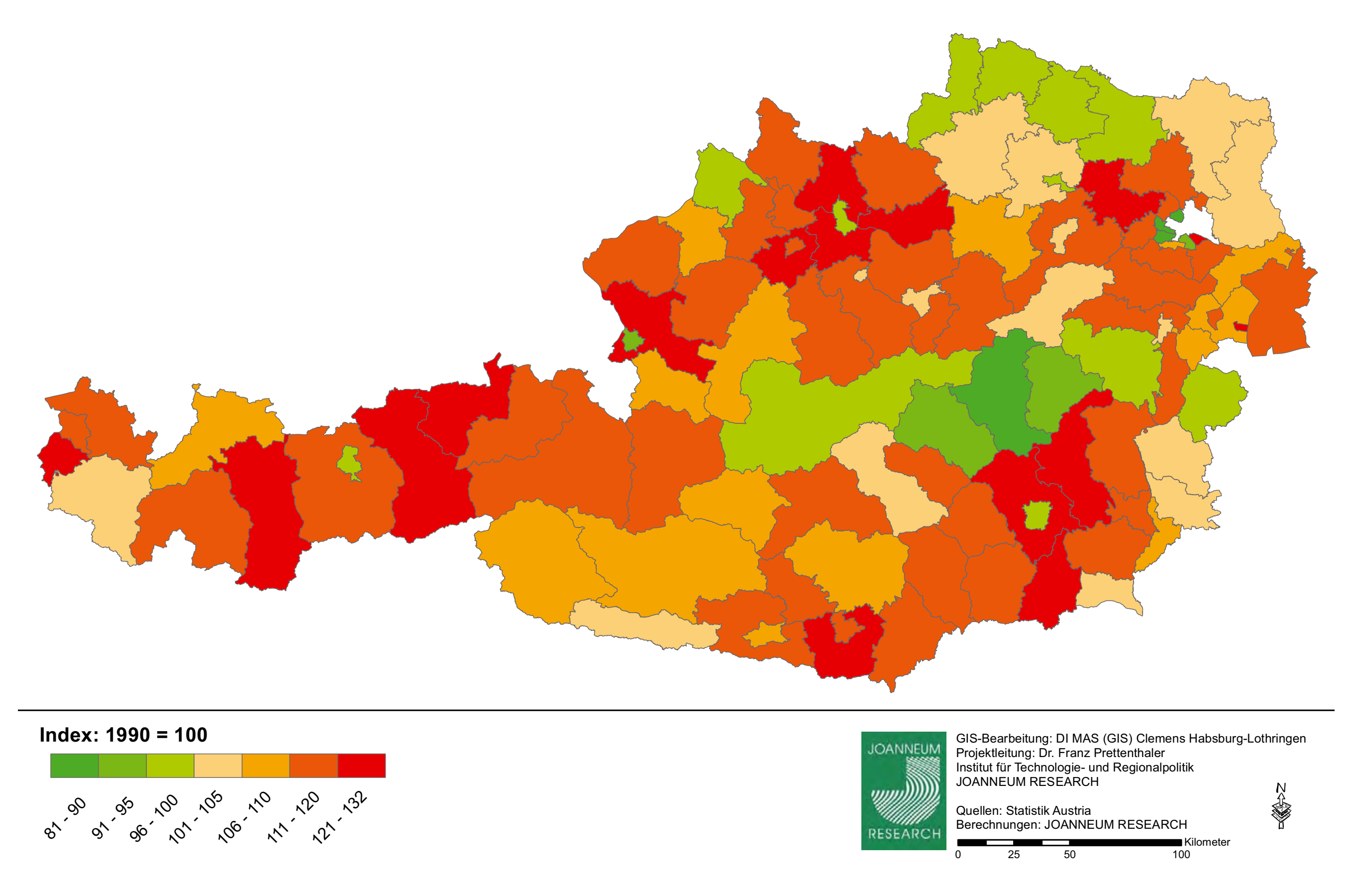


Abbildung 6.15 Entwicklung der versicherten Summe von Wohngebäuden im Bereich HQ100, 1990-2007. Quelle: Prettenthaler (2010)
Figure 6.15 Development of the insured sum of residential buildings in the area HQ100 1990-2007. Source: Prettenthaler (2010)

zierte Schadensbilder unter Berücksichtigung des Klimawandels ableiten zu können, werden vorab Annahmen hinsichtlich des Klimawandels (Temperatur und Niederschlag) angeführt, die zum unten diskutierten Erkenntnisgewinn innerhalb des Teilkapitels geführt haben.

Die Signale der Klimaprojektionen hinsichtlich der Temperaturentwicklung sind eindeutig und robust, wohingegen die Niederschlagsänderungen (Jahressummen bzw. saisonale Summen) bedeutend unsicherer sind (Band 1, Kapitel 4). Abschätzungen über Extremereignisse sind mit großen Unsicherheiten verbunden (ebenda). Generell ist anzunehmen, dass kleinräumige (konvektive) Starkniederschläge und Gewitter in Frequenz und Intensität zunehmen könnten (lokal begrenzte Hochwasser können auftreten). Darüber hinaus kann auf Grundlage dieser Studien eine Zunahme großräumiger (advektiver) Starkniederschläge zumindest im West- und Nordstau der Alpen als wahrscheinlich angesehen werden. Diese Simulationen zeigen, dass die längere Starkniederschläge auslösenden Wetterlagen an Häufigkeit und Intensität zunehmen werden (Band 1, Kapitel 4).

Hochwasser

Basierend auf den aufgezeigten Klimaprojektionserkenntnissen kann davon ausgegangen werden, dass zukünftige Veränderungen im Hochwassergeschehen wesentlich durch Veränderungen der Temperatur bedingt sein werden (Blöschl und Montanari, 2010). Gesicherte statistische Aussagen über Zu- oder Abnahmen von Hochwasserereignissen sind nach heutigem Kenntnisstand nicht möglich (Band 2, Kapitel 2). Die Unsicherheiten sind speziell in kleinen Einzugsgebieten groß. Wenn-Dann-Szenarien zeigen eine Änderung des 100-jährlichen Hochwassers zwischen –4 bis +10 % und eine Verschiebung des jahreszeitlichen Auftretens der Hochwasser mit früheren Frühjahrs- und mehr Winterhochwasser (BMLFUW, 2011). Für das Lech-Einzugsgebiet in Tirol wird angenommen, dass eine allgemeine Abnahme in der Intensität von mittleren jährlichen Hochwassern zu erwarten ist. Auch die Saisonalität verschiebt sich: weniger Ereignisse im Sommer, jedoch mehr Ereignisse im Winter und Frühjahr (Dobler et al., 2012). Darüber hinaus weisen u.a. BMLFUW (2010) oder Blöschl et al. (2011) explizit auf die hohe Variabilität von Hochwasserer-

eignissen und auf das Auftreten von Dekaden mit hoher und geringer Ereignisdichte („hurst effect") hin. Allgemein wird in diesen Studien der Einfluss der Landnutzungsänderung auf das Abflussverhalten (Verstärkung, aber auch Abschwächung) bei Hochwasserereignissen nicht mit berücksichtigt.

Hinsichtlich zukünftiger Schadenspotenziale und Schadensbilder ergeben sich mehrere Möglichkeiten: generell kann von einer Zunahme der Hochwasserschäden ausgegangen werden, wobei Präventionsmaßnahmen maßgeblich gegensteuern und sich Schäden im Idealfall nicht erhöhen sondern reduzieren lassen könnten (näheres dazu in Band 3).

Schäden in Gefahrenzonen dürften sich im langjährigen Trend bewegen, wobei sich weitere Präventionsmaßnahmen (Bauverbote in Hochwassergefahrenzonen) schadensmindernd auswirken werden. Im Grenzbereich zu den Gefahrenzonen ist jedoch davon auszugehen, dass sich die Schadenspotenziale in Anbetracht der prognostizierten Bevölkerungs- und sozioökonomischen Entwicklung wesentlich erhöhen werden. Ereignisse mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit größer der Schutzzieldefinition (100-jährliches Ereignis) führen zwangsläufig zu enormen Schäden, wobei dadurch in Summe mittel- bis langfristig mit einer starken Zunahme von Schäden zu rechnen ist. Zwar werden sich auch künftig Dekaden mit einer zeitlichen Häufung von Ereignissen mit Dekaden mit geringeren Schäden abwechseln, doch langfristig ist anzunehmen, dass die Hochwasserschäden zunehmen werden, wobei die Intensität der Zunahme in Abhängigkeit der beschriebenen Rahmenbedingungen liegen wird.

Neben dem von Fließgewässern ausgehenden Hochwasserrisiko werden in Zukunft Schäden durch innerstädtisches Hochwasser („urban flooding") – in Form einer Kombination aus starkem Oberflächenabfluss (sehr geringe Versickerungskapazität in Siedlungsräumen) und der Überlastung des Kanalisationsnetzes (Siedlungswasserwirtschaft) bei Starkregenereignissen – wahrscheinlich an Bedeutung gewinnen. Bereits heute verursacht dieser Hochwassertyp in Großbritannien 40 % der gesamten Hochwasserschäden, in Zukunft wird von einer weiteren Zunahme ausgegangen (Penning-Roswell et al., 2004). Auch wenn (noch) keine klare Aussagen bezüglich der Veränderung von extremen Starkregenereignissen möglich sind, führen der sozio-ökonomische Strukturwandel sowie Alter und Zustand der Kanalisationsnetze möglicherweise zu einer deutlichen Zunahme an Schäden. Neben der erhöhten Konzentration von Werten im innerstädtischen Bereich ist dies vor allem dem Zustand geschuldet, dass die generelle Siedlungsverdichtung und die überproportionale Zunahme von Einpersonenhaushalten mit einem erhöhten Wasserverbrauch, vor allem im städtischen Bereich, sowie die Siedlungsausdehnungen bedeutend höhere Abwasserkapazitäten benötigen bzw. deutlich schneller zu kritischen Konstellationen führen werden. Der Grad der Auswirkungen ist wesentlich von der Entwicklung der siedlungswasserwirtschaftlichen Infrastruktur und möglichen innovativen Technologien abhängig. Adäquate Anpassungsmaßnahmen können das Schadenrisiko wesentlich reduzieren (Kleidorfer et al., 2014).

Der „Klimareport Südtirol" führt an, dass Vorhersagen hinsichtlich Starkregenereignisse schwierig vorhersagbar und unklar sind. Es wird jedoch von einer Zunahme von konvektiven Starkregenereignissen mit einem erhöhten Risikopotenzial von allgemeinen Wassergefahren (Überschwemmung, Mure, Übersarung[7]) ausgegangen. Die konkreten Auswirkungen hängen nach der Studie stark vom Einzelfall ab (Zebisch et al., 2011). Teilergebnisse des nationalen Forschungsprogramms „Klimaänderungen und Naturkatastrophen" (Bader und Kunz, 1998) gehen für die Schweiz von der Annahme aus, dass es zu einer 30 bis 100 % klimabedingten Erhöhung der Schäden kommen wird. Neuere Arbeiten in der Schweiz mit einem Zeithorizont bis 2050 (Ecoplan, 2007) sehen diese Annahme jedoch kritisch, da sich zum einen ein differenzierteres Bild der Gefährdung abzeichnet (keine wesentliche klimainduzierte Veränderung im schadensintensiveren alpinen Bereich und Zunahme der Winterhochwasser im nördlichen Alpenvorland, Aussagen bezüglich Hochwasserentwicklung unsicher) und sich zum anderen die Hochwassererwartungsschäden, trotz entsprechender Zunahme des Schadenpotenzials, durch geeignete Anpassungsmaßnamen wesentlich reduzieren lassen können. Ob entsprechende Anpassungsmaßnahmen umgesetzt werden, ist politisch jedoch noch unklar. Der „Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft" sieht dagegen ein deutliches Bild für Deutschland (zumindest für die Einzugsgebiete der fünf großen deutschen Flüsse Rhein, Donau, Elbe, Ems und Weser). Demnach werden durch Zunahme der Ereignisse die Schäden in den nächsten Jahrzehnten stark ansteigen, dies auf Basis der heutigen Kennzahlen und Werte. Vier zentrale Einflussfaktoren für zukünftige Schadensbilder werden hierbei angeführt: klimatische Veränderungen, politische Rahmenbedingungen, Verhalten der privaten Haushalte und Werteentwicklung der Gebäude. Bis 2100 wird mit einer Verdoppelung bis Verdreifachung der Schäden gerechnet. Zudem ist je nach zugrundeliegendem Szenario mit einer höheren Ereignisvariabilität zu rechnen. Das tatsächliche Maß ist jedoch stark von der Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen abhängig (GDV, 2011).

[7] Großflächige Ablagerungen von alpinen Wildbächen außerhalb ihres Gerinnes

Muren

Murereignisse treten in kleinräumig definierten Wildbacheinzugsgebieten auf. Eine generalisierte Aussage über veränderte Frequenz-Magnitude-Beziehungen in bestehenden Mureinzugsgebieten ohne Permafrost ist nicht möglich, da die spezifische Situation im Einzugsgebiet zum Zeitpunkt des Niederschlagsereignisses bestimmt, ob ein fluviatiler Feststofftransport (oft ohne Schadenwirkung) oder weitere Prozessarten bis hin zum Murgang ausgelöst werden.

Da Murereignisse einen Starkniederschlag als auslösendes Ereignis benötigen, die Intensität des Ereignisses jedoch wesentlich vom vorhandenen Geschiebepotenzial abhängt, sind als Folge des Klimawandels zusätzlich zu den bestehenden Murpotenzialen drei neue Prozessdimensionen zu erwarten:

1. Neu entstehende Muranrissgebiete oder Verschiebung der Muranrissgebiete in höhere Lagen durch Auftauen der Permafrostuntergrenze.
2. Erhöhte oder neu entstehende Geschiebepotenziale in Umlagerungsstrecken (Geschiebe-Remobilisierung) durch permafrostbedingte Primärprozesse (Rutschungen, Fels- und Bergstürze, Hangmuren).
3. Neu entstehende Muranrissgebiete in bekannten Einzugsgebieten oder neue Prozessräume durch reduzierte Schutzfunktion des Waldes aufgrund erhöhter Vulnerabilität im Hinblick auf Trockenstress, Schädlingsbefall, Waldbrand, Sturm und Waldvitalität. Diese können allerdings auch lediglich von lokaler Relevanz sein.

Aussagen hinsichtlich einer geänderten Frequenz-Magnitude von Murgängen, die ausschließlich auf Projektionen von starken Niederschlagsereignissen basieren, sind nach heutigem Kenntnisstand nicht möglich. Der Zusammenhang zwischen mittlerer jährlicher Niederschlagsumme und Murereignissen (Bacchini und Zannoni, 2003) würde zuerst die Vermutung nahe legen, dass keine Änderung zu erwarten ist, jedoch eine Abnahme im Sommer und Zunahme in den Übergangsjahreszeiten möglich wird. Bei einer zusätzlichen Berücksichtigung des eindeutigen Temperaturtrends sind die oben beschriebenen Szenarien (vor allem 1. und 2.) wahrscheinlich. Die Implikationen auf das zukünftige Schadensbild werden im Folgenden kurz diskutiert, wobei angenommen wird, dass alle Wildbäche in siedlungsrelevanten Gebieten entsprechend der Schutzzieldefinition verbaut sind.

In Siedlungen im Bereich von Wildbacheinzugsgebieten ohne Permafrost wird es möglicherweise bei Ereignissen bis zur Bemessungsgrenze (150 Jahren) zu keiner oder nur einer leichten Erhöhung der Schadensbilder kommen. Die leichte Erhöhung wird durch zusätzliche Schadenspotenziale im Bereich der Baulandreserven innerhalb der gelben Zonen begründet, aufgrund der baulichen Auflagen dürfte diese Erhöhung aber nicht besonders stark ausfallen. Entsprechende Präventionsmaßnahmen könnten aber auch zu einer Abnahme der Schäden führen. Die zu erwartenden Schadenspotenzialzunahmen und -konzentrationen speziell an den Randbereichen zu den Gefahrenzonen lassen den Schluss zu, dass bei Ereignissen oberhalb der Bemessungsgrenze die Schäden deutlich zunehmen könnten. In Einzugsgebieten mit ansteigender Permafrostuntergrenze ist zu erwarten, dass es zu einer Zunahme von Ereignissen und somit zu einer veränderten Frequenz-Magnitude-Beziehung kommt. Die Konsequenzen haben dabei zweierlei Auswirkungen:

- zum einen kann sich die Intensität der Bemessungsereignisse aufgrund des erhöhten Geschiebepotenzials verstärken und damit können möglicherweise Schutzziele nicht mehr gewährt werden,
- zum anderen wird sich die Intensität seltener Ereignisse verstärken, was auch ohne erhöhtes Schadenpotenzial erhöhte Schäden bedeutet.

Im Fall der ersten Auswirkung ist zu erwarten, dass zur Verhinderung von größeren Risiken und höherer Schäden Mehrinvestitionen in die Anpassung von Schutzmaßnahmen notwendig werden. Bei der Betrachtung der zweiten Auswirkung ist anzumerken, dass eine starke Zunahme aufgrund der Schadenspotenzialdynamik zu erwarten ist. Diese Situation betrifft jedoch ausschließlich Wildbacheinzugsgebiete mit Permafrost und Wirkungsbereiche bis in Siedlungsgebiete.

Zusammenfassend ist anzumerken, dass Wildbach-induzierte Schäden zunehmen werden. Die Intensität der Zunahme kann aber wesentlich durch entsprechende Präventionsmaßnahmen beeinflusst bzw. eingeschränkt werden. Ähnlich dem Hochwasser ist zu vermuten, dass sich Dekaden mit erhöhter Prozessaktivität mit Dekaden geringerer Aktivitäten abwechseln.

Die potenziellen Auswirkungen für Südtirol sind ident derjenigen für Hochwasser, für Deutschland liegen keine Analysen vor. Für die Schweiz wird angeführt, dass es (noch) nicht beurteilbar ist, ob es zu häufigeren Starkniederschlägen kommt und ob eine Häufung von Starkniederschlagsereignissen auch zu vermehrten Murereignissen führen wird. Die Veränderung wird auch in der Schweiz durch veränderte Geschiebepotenziale im Bereich des auftauenden Permafrostes gesehen. In Abhängigkeit des größeren Volumens wird angenommen, dass

die Schäden bis 2050 zunehmen werden. Die Zunahme ist aber, neben der zugrunde liegenden Annahme im Hinblick auf das erhöhte Gefährdungspotenzial, stark von den zu setzenden Anpassungsmaßnahmen abhängig. Von den Autoren wird darauf hingewiesen, dass die Einschätzungen als sehr spekulativ anzusehen sind (Ecoplan, 2007).

Lawinen

Schadenlawinenereignisse wie etwa 1999 (u. a. in Galtür) resultieren aus extremen Niederschlagsereignissen mit enormen Neuschneezuwächsen innerhalb weniger Tage. Nach heutigem Kenntnisstand ist es nicht möglich, Aussagen hinsichtlich der Veränderung von einzelnen Starkniederschlagsereignissen unter Klimawandelbedingungen zu tätigen. Allgemein ist jedoch ein Trend zu erhöhten Winterniederschlägen speziell nördlich des Alpenhauptkammes zu erwarten, was jedoch noch keine Rückschlüsse auf starke bzw. extreme Winterniederschlagsereignisse zulässt. Speziell Winterniederschläge werden maßgeblich von der Nordatlantischen Oszillation (NAO) gesteuert, die kurzfristigen Schwankungen und langfristigen Trends unterliegt. Der Einfluss des anthropogenen Klimawandels auf die NAO ist Gegenstand der aktuellen Forschung. Ein genereller Anstieg der Temperatur, auch im Winter, hat zur Folge, dass in manchen bisher potenziell gefährdeten, tieferen Lagen die Disposition für Schadenlawinen nicht mehr gegeben ist.

Nach OcCC (2007) ist es zumindest für die gesamte Schweiz in Summe unklar, ob Lawinenereignisse in Zukunft häufiger oder seltener eintreten werden. Regional kann es jedoch zu Veränderungen aufgrund erhöhter Temperaturen und saisonal-veränderter Niederschlagsregime kommen. Risiken sind lokal abzuschätzen und gegebenenfalls sind Maßnahmen zur Risikominimierung zu setzen (Egli, 2005). In Österreich besteht im Wege der örtlichen Raumplanung zwar eine Gefahrenzonenausweisung für Lawinen und gefährdete Gebiete werden durch Verbauungsmaßnamen bis zu einem definierten Schutzziel geschützt, allerdings ist davon auszugehen, dass das Schadenspotenzial aufgrund der freien Baulandreserven in den gelben Zonen weiter ansteigen wird, wobei unter Berücksichtigung präventiver bautechnischer Auflagen mit keiner Erhöhung der Schadenbilder zu rechnen ist.

Zieht man die zu erwartende starke Zunahme des Schadenpotenzials – und hierbei speziell im Grenzbereich zwischen Gefahrenzonen und nicht ausgewiesenen Gebieten – heran, so kann geschlossen werden, dass extreme Schadenlawinenereignisse (> Bemessungsereignis) in Zukunft nicht zunehmen werden aber die Schadenskonsequenzen innerhalb der Gefahrenzonen leicht und außerhalb der ausgewiesenen Gefahrenzonen stark ansteigen werden. Die weiter oben (bei „Muren“) angeführte Situation von neu entstehenden Prozessbereichen aufgrund einer möglicherweise erhöhten Vulnerabilität des Waldes gegenüber Sturmereignissen ist Gegenstand des laufenden ACRP-Projekts FIRIA („Fire Risk and Vulnerability of Austrian Forests under the Impact of Climate Change“). Diese Flächen sind aber hinsichtlich der Lawinenbildung relativ klein und genau zu definieren. Insgesamt muss darauf hingewiesen werden, dass Lawinen eine regional sehr begrenzte Wirkung haben und Sachschäden im bundesweiten Vergleich mit anderen Risiken relativ gering sind. Betrachtet man jedoch die historische Anzahl an Todesfällen durch Naturgefahrenereignisse in Österreich (EM-DAT International Disaster Database[8]) so sind bislang mit Ausnahme der Hitzewelle von 2003 (350 Todesfälle) am meisten Menschen durch Großschadenlawinen (1950er Jahre und 1999) ums Leben gekommen (gefolgt von 43 Todesfällen durch Massenbewegungen, 39 durch Hochwasser- und 22 durch Sturmereignisse). Eine zukünftige Entwicklung hierzu ist nicht abschätzbar.

Massenbewegungen (Rutschungen, Sturzprozesse)

Analog zu Lawinen sind Massenbewegungen, die Siedlungsräume betreffen, relativ genau abgrenzbar und haben in der Regel ein vergleichsweise geringes kumulatives Schadenspotenzial. Das hierunter fallende Prozessspektrum reicht von langsam aber kontinuierlich ablaufenden Kriech- und Rutsch- (flach- bis tiefgreifende Massenbewegungen) bis hin zu Sturzbewegungen (Steinschlag, Fels- und Bergstürze) mit kurzfristig extremen Beschleunigungsraten. Neben Wirkungsbereichen, die Siedlungsgebiete und Talräume betreffen, sind unter Klimawandelbedingungen vor allem Prozessräume im Bereich des auf den Temperaturanstieg sensibel reagierenden Permafrosts von großer Bedeutung. Hierbei können vor allem Infrastrukturen direkt betroffen sein oder Massenbewegungen stellen den Primärprozess dar, der speziell für Murprozesse ein erhöhtes Geschiebepotenzial bieten und somit in einer Prozesskaskade zu Schäden im Siedlungsgebiet führen kann (siehe „Muren“). Eine generelle Aussage über Effekte aus Massenbewegungen ist schwer möglich, da jede Lokalität einer spezifischen Geologie und Lithologie unterliegt und das gesamte Prozessgefüge (Prädisposition und auslösendes Ereignis) aus dem mehrphasigen Wechselspiel unterschiedlicher Dynamiken zu betrachten ist.

Klimasensible Prädispositionen außerhalb des Permafrosts betreffen vor allem den Niederschlag (feuchtere Klimabe-

8 http://www.emdat.be/database

dingungen) bzw. den Bergwasserspiegel. Auslösende Ereignisse können neben einer Vielzahl von weiteren Dynamiken (z. B. Seismik) Starkniederschläge sein. Aus den vorgestellten Klimaprojektionen ist jedoch nicht ableitbar, dass sich diese Situationen unter geänderten klimatischen Bedingungen signifikant ändern werden, sodass keine kausalen Zusammenhänge zwischen Klimawandel und Massenbewegungen abgeleitet werden können. Aufgrund der kleinräumigen, in der Regel gut abgrenzbaren Prozessräume und dem staatlichen Naturgefahrenmanagement kann davon ausgegangen werden, dass trotz eines erhöhten Schadenspotenzials die Schäden nicht weiter zunehmen werden. Die Auswirkungen im Bereich des Permafrosts und Implikationen für Siedlungsgebiete wurden weiter oben (bei „Muren“) diskutiert. Einen Spezialfall stellen tiefgründige Massenbewegungen oder Sturzprozesse mit großen Volumina dar, die aufgrund von plötzlich auftretenden enormen Bewegungsraten unter Umständen bestehende Speicher von Wasserkraftanlagen betreffen und dadurch einen Kaskadeneffekt auslösen könnten (ein katastrophales, jedoch durch Speichermanagement ausgelöstes Ereignis stellt hierbei Vajont 1963 dar). Derartige Szenarien sind jedoch spekulativ und werden hier, auch unter dem Gesichtspunkt, dass bestehende Speicher einem ausgefeilten Genehmigungs- und Monitoringkonzept unterliegen, nicht weiter betrachtet. Auch gibt es hierzu keine publizierten Studien. Durch den Anstieg der Permafrostuntergrenze und dessen Auswirkung auf Massenbewegungen im Hochgebirge können mögliche klimainduzierte Veränderungen das Gefährdungspotenzial von derartigen Speicheranlagen erhöhen. Belegbare Aussagen hierzu sind jedoch nicht möglich.

Der „Klimareport Südtirol“ sieht einen klaren Zusammenhang zwischen Klimawandel und Sturzprozessen, die Aussagen beziehen sich jedoch ausschließlich auf den nicht-siedlungsrelevanten Bereich (Zebisch et al., 2011). In den berücksichtigten Studien aus der Schweiz (Ecoplan, 2007; OcCC, 2007) wird auf diesen Prozesstyp nicht weiter eingegangen, für Deutschland liegen keine Ergebnisse vor.

Hagel

Hagelereignisse sind konvektive Ereignisse, die durch eine einzelne Hagelzelle sehr lokal auftreten oder aufgrund der Formierung von mehreren Hagelzellen zu einem Sturmsystem auch große Flächen mit mehreren Hagelstrichen betreffen können. So können Hagelzellen ein mesoskaliges konvektives Sturmsystem (MCS) entwickeln, das sich über mehrere hundert Kilometer erstrecken kann. Voraussetzung für die Entstehung von Hagelereignissen sind starke Aufwinde in einer labil geschichteten Atmosphäre, wobei die Alpen und vor allem der Alpenvorraum durch topographisch bedingte thermodynamische Prozesse eine ideale Grundvoraussetzung zur Bildung derartiger Ereignisse darstellen. Die Bildung von MCS bedingt dagegen spezielle Großwetterlagen (Trogwetterlage im Süden, Kaltfront mit großen Temperaturunterschieden im Westen Europas, geringe Druckunterschiede und labile Schichtung im Entstehungsgebiet). Hagelereignisse sind durch räumlich und zeitlich hoch variable Zugbahnen gekennzeichnet und es ist oft zufällig, ob ein Ereignis Siedlungsgebiete mit hoher Schadenpotenzialkonzentration betrifft oder nicht (siehe München 1984), was u. a. die temporale Variabilität großer Schadenereignisse betrifft.

Eine mögliche klimawandelinduzierte Zunahme von Frequenz und Stärke von Hagelereignissen hängt vor allem von der Auswirkung des Klimawandels auf die Labilität der Luftschichtung in der Troposphäre sowie einer möglichen Dynamik hinsichtlich der Großwetterlagen ab (Schieser, 2003). Diese Frage kann zum derzeitigen Stand noch nicht beantwortet werden und ist Bestand aktueller Forschungsprojekte (u. a. HARIS-CC am Karlsruher Institut für Technologien). Für zukünftige Entwicklungen ist jedoch ein eindeutiger Trend hinsichtlich der Schadensentwicklung absehbar. Hierzu führen im Wesentlichen drei Komponenten der sozioökonomischen Entwicklung:

- eine erhöhte Schadenspotenzialkonzentration vor allem in den Ballungsräumen durch Bevölkerungs- und Siedlungsentwicklung, ein verändertes Mobilitätsverhalten und die Zunahme exponierter Kraftfahrzeuge,
- die Zunahme dezentraler nicht-fossiler Energieanlagen (Solar- und Photovoltaikanagen, Biomassenanlagen und dazugehörige Produktionsflächen) sowie eine erhöhte Vulnerabilität moderner Gebäudestrukturen und -fassaden sowie alternativer Energieanlagen gegenüber Hagelereignissen (Hagelschlag, Sturmböen und Starkregen).

Es ist somit zu erwarten, dass auch bei gleicher Zahl an Hagelereignissen das Ausmaß an Hagelschäden in Zukunft stark zunehmen wird. Aufgrund einer gewissen Zufälligkeit in den Entstehungsgebieten und den Zugbahnen ist eine räumliche und temporale Variabilität der Schadenereignisse zu erwarten.

Zebisch et al. (2011) kommen für Südtirol zu der Auffassung, dass nach heutiger Datenlage (Temperaturzeitreihen und Hageldokumentationen) keine Korrelation zwischen der beobachteten Temperaturzunahme der letzten Jahrzehnte und einer veränderten Hageldynamik besteht. Die NFP 31-Studie in der Schweiz ging von einer generellen Zunahme von

Sturm- und Hagelschäden um 30 bis 50 % aus (Bader und Kunz, 1998), dies ist nach heutigem Kenntnisstand überholt, Prognosen zu klimabedingten Veränderungen von Hagelereignissen können noch nicht gemacht werden (Ecoplan, 2007). Für Deutschland geht der Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV) von einer Zunahme von Hagelschäden im Sommer aus (GDV, 2011). Da keine weitere Differenzirrung zwischen Hagel und Sturm vorgenommen wird, wird hierzu auf den nächsten Abschnitt verwiesen.

Sturm (Wintersturm)

Obwohl Österreich regelmäßig von Winterstürmen betroffen ist und auch hohe Schadenssummen zu verzeichnen sind, kann die generelle Gefährdung im Vergleich mit anderen mitteleuropäischen Staaten als relativ moderat eingestuft werden. Potenzielle Veränderungen der Frequenz-Magnitude von schadensrelevanten Winterstürmen sind eng mit der Nordatlantik-Oszillation (NAO) gekoppelt. Hierbei ist ein positiver NAO-Index auf einem mitteleuropäischen Maßstab zumeist verbunden mit feucht-warmen, sehr niederschlagsreichen Witterungslagen sowie häufigen Sturmereignissen aufgrund der Luftdruckunterschiede. Die NAO unterliegt kurzfristigen Schwankungen und langfristigen Trends (siehe auch oben, in „Lawinen“). Neueste wissenschaftliche Erkenntnisse weisen darauf hin, dass vor allem die Ozeantemperatur („Ocean Heat Content“, OHC) der signifikanteste Faktor für dekadische Variabilität der Sturmaktivität ist.

Hinsichtlich potenzieller klimainduzierter Veränderungen der Sturmaktivität muss angeführt werden, dass es noch große Unterschiede und Unstimmigkeiten zwischen unterschiedlichen Klimamodellen gibt und dadurch eine robuste Projektion (noch) nicht möglich ist (vgl. Band 1, Kapitel 4). Bezüglich zukünftig zu erwartender Schadensbilder kann dieselbe Argumentation wie unter „Hagel“ angeführt werden, wobei die Kaskoschäden nicht eine derartig große Rolle spielen. Es kann davon ausgegangen werden, dass Sturmschäden auch in Österreich in Zukunft zunehmen werden, jedoch unter starker dekadischer Variabilität. Neben Schäden an Gebäuden führen Sturmereignisse vor allem zu Schäden im Wald mit entsprechenden Implikationen für die Entstehung bzw. Intensitätsverstärkung von Naturgefahren (siehe „Muren“ und „Lawinen“), was lokal von Bedeutung sein kann, jedoch das kumulative Schadenspotenzial in Österreich nicht wesentlich beeinflusst.

Für die Schweiz ging man nach älteren Arbeiten von einer Zunahme der Schäden von 30 bis 50 % aus (Zebisch et al., 2011). Laut Ecoplan (2007) ist in der Schweiz mit keinen wesentlichen Veränderungen der Sturmschäden im Vergleich zu heute zu rechnen. Der GDV dagegen geht für Deutschland davon aus (Sturm und Hagelschäden werden jedoch hierbei zusammengefasst), dass es zu einer generelle Zunahme von Sturmschäden um 7 % bis 2040 und 28 % bis 2070 kommen wird. Die Zunahme wird räumlich und saisonal unterschiedlich ausfallen: der Nordwesten Deutschlands ist wesentlich stärker betroffen (teilweise Anstieg der Schäden um 100 %) und die Zunahme von Schäden wird im Sommer wesentlich markanter ausfallen als im Winter (bis 2070 um 60 % im Sommer und 16 % im Winter). Da keine Differenzierung zwischen Sturm und Hagel vorgenommen wird, kann die Zunahme im Sommer auch auf eine Zunahme der Hagelschäden zurückzuführen sein. Die Zunahme der durchschnittlichen Schäden liegt vor allem in der Zunahme von extremen Ereignissen begründet, der Schadensatz der Extremereignisse steigt um das 4-fache (GDV, 2011).

Der aktuelle Bericht „Klimaänderungen der Schweiz – Indikatoren zu Ursachen, Auswirkungen und Massnahmen“ führt an, dass es aus wissenschaftlicher Sicht derzeit nicht möglich ist, einen Zusammenhang zwischen dem Klimawandel und der Häufigkeit von Naturkatastrophen (Hochwasser, Muren, geologische Massenbewegungen, Lawinen und Stürme) herzustellen. Den wesentlichen Ansatzpunkt zur Verringerung von Naturgefahrenschäden stellt hierbei das integrale Risikomanagement (vor allem technische und raumplanerische Maßnahmen sowie organisatorische Maßnahmen des Bevölkerungsschutzes) dar (Perroud und Bader, 2013).

Fraglich bleibt, ob nicht andere Einflussfaktoren (sozioökonomische und institutionelle Veränderungen und Rahmenbedingungen) stärker als der Klimawandel auf zukünftige Schadensbilder und deren Veränderung im Vergleich zur heutigen Risikosituation wirken.

6.5.5 Risikotransfer durch Naturgefahrenversicherung

Im Gegensatz zu staatlichen Maßnahmen des integralen Naturgefahren-Risikomanagements sind Versicherungen ein solidargemeinschaftliches System zur Kompensation von allfälligen Schäden, die über das Prinzip der Risikostreuung oder auch das Prinzip der großen Zahlen funktionieren. Bis zu einer gewissen Systemobergrenze der Schadenssumme kann ein derartiges System effektiv funktionieren, vorausgesetzt, das Risiko ist für den Versicherer auch in einer gewissen Weise kalkulierbar. Versicherungen können auch über gewisse Auflagen und (finanzielle) Anreizsysteme (etwa reduzierte Prämien) wesentlich zur Prävention und damit zur Schadensminderung beitragen. Generell stellt die Prävention (Bewusstseinsbildung

und Anpassungsmaßnahmen) ein sehr effektives Instrumentarium zur Schadensminderung dar. Aufgrund ihrer öffentlichen Wahrnehmung und Wirkung können Versicherungen durch Marketing- und PR-Maßnahmen auch dazu beitragen, klimaschädliche CO_2-Emissionen zu reduzieren. In der Schweiz hat sich in 19 Kantonen ein Obligatorium (verpflichtende Naturgefahrendeckung ohne Haftungsgrenzen) durch kantonale Gebäudeversicherer bewährt, in den Kantonen Genf, Uri, Schwyz, Tessin, Appenzell Innerrhoden, Valais und Obwalden besteht ein ähnliches privatwirtschaftlich organisiertes System. Hierbei wird das Gebäude samt Hausrat bzw. Geschäftsinventar zum Vollwert gegen Elementarschäden versichert, der Deckungsumfang und die Prämientarife sind für alle Versicherungsnehmer einheitlich und verbindend. Die zur Naturgefahrendeckung verpflichtete Kantonale Gebäudeversicherung ist bereits bei der Baubewilligung mit involviert und kann gegebenenfalls bestimmte Objektschutzmaßnahmen verpflichtend fordern. Die Eigenverantwortung der einzelnen Versicherten ist Bestandteil des Systems. Demnach ist jeder Versicherte verpflichtet, eigenverantwortlich zur Ressourcenvorsorge für den Ereignisfall zu sorgen. Bei Nichterfüllung kann die Versicherung entsprechend die finanzielle Schadenskompensation kürzen.

Aus ökonomischer Sicht funktioniert die Koordination von Elementarschadenversicherungen über den bestehenden Markt mit seinen derzeitigen Rahmenbedingungen in Österreich nicht effizient und wird deshalb als Marktversagen bezeichnet. Gründe hierfür sind u. a. die „adverse Selektion“ (in einem freien, nicht verpflichtenden Markt versichert sich auch nur der Versicherungsnehmer, der offensichtlich einem Risiko unterliegt; etwa Hochwasserversicherung im hochwassergefährdeten Gebiet) sowie ein „moral hazard“-Verhalten (aufgrund einer bestehenden Versicherung verhält sich der Versicherungsnehmer nicht mehr risikogerecht im Sinne der Prävention) und ein „charity hazard“-Verhalten (Vertrauen auf staatliche oder anderweitig organisierte Hilfszahlungen, die den Abschluss einer Versicherung nicht notwendig erscheinen lassen) (Prettenthaler und Albrecher, 2009; Holub et al., 2011).

Zusammengefasst besteht in Bezug auf private Sachschäden an Gebäuden und Inventar in Österreich keine zufriedenstellende Situation, lediglich im Spezialsegment für Industrieunternehmen und Großgewerbe können die angebotenen Versicherungsprodukte als zufriedenstellend bezeichnet werden (Holub et al., 2011). Für alle weiteren Segmente kann auf freiwilliger Basis ein Versicherungsschutz im Rahmen der Sturmschadenversicherung erworben werden. Dieses Produkt stellt aber keine umfassende Versicherungslösung dar und deckt lediglich Schäden aus Sturm, Hagel, Schneedruck und Sturzprozessen mit der vollen Versicherungssumme. Alle weiteren Schäden aus Naturgefahrenprozessen sind ausgenommen bzw. haben im Rahmen der Sturmschadenversicherung eine sehr geringe Deckungssumme (üblicherweise zwischen 3700 und 15000 €). Bei einigen wenigen Versicherungsunternehmen ist ein zusätzlicher Deckungsumfang bis zu 50 % der Versicherungssumme für diese weiteren Naturgefahrenprozesse möglich. Durch die Freiwilligkeit besteht jedoch die Gefahr der negativen Selektion im Versicherungskollektiv („adverse Selektion“) und die Prämien hierfür sind entsprechend hoch. Das heißt, für Hochrisikozonen besteht kein adäquates bzw. nur ein sehr eingeschränktes Angebot. Die Versicherungsdichte von Sturmschadenversicherungen beläuft sich in Österreich auf ca. 50 %, für Hochwasser auf 10–15 % (Prettenthaler und Vetters, 2009). Darüber hinaus gibt es zur eigenen Kumulkontrolle der Versicherungsunternehmen eine zusätzliche Kumulkontrolle. Werden vertraglich definierte Höchstschadenlimits erreicht, die je nach Versicherungsunternehmen unterschiedlich hoch sind, behält sich der Versicherungsunternehmer vor, die Gesamtschädigungssumme über diesem Limit aliquot zu kürzen. Dieser Anspruch wurde jedoch bis dato in Österreich noch nie vollstreckt (Schieferer, 2006) bzw. wurde nach dem Hochwasser von 2002 von einer Versicherung davon Gebrauch gemacht (Vetters, 2006).

Auf Ausschüttungen aus dem staatlichen Katastrophenfonds herrscht kein Rechtsanspruch und es besteht somit ein hohes Maß an Unsicherheit für die Betroffenen. Aufgrund der Finanzierung des Katastrophenfonds über das Steuersystem stellt er eine quasi Pflichtversicherung dar. Da Versicherungsleistungen von der Entschädigung aus dem Katastrophenfonds üblicherweise in Abzug gebracht werden, entsteht ein Nachteil für jene mit präventivem, wenn auch nur relativ begrenztem, versicherungstechnischem Risikotransfer und die Entschädigungshöhen variieren je nach Bundesland (Prettenthaler und Albrecher, 2009). Durch die jährliche Abschöpfung des Katastrophenfonds kommt es auch zu keiner Reservebildung für größere Schadenereignisse (Prettenthaler und Vetters, 2009).

6.6 Auswirkungen des Klimawandels auf Siedlungsräume
6.6 Climate change impacts on settlement areas

Mehr als die Hälfte aller ÖsterreicherInnen lebt in Stadtregionen. Diese Stadtregionen werden zukünftig einen weiteren Bevölkerungszuwachs erfahren (ÖROK, 2009). Neben sozio-

ökonomischen Entwicklungen nehmen aber auch klimatische Veränderungen und Wetterereignisse Einfluss auf Siedlungsräume. Dabei ist der Einfluss des Klimawandels auf Siedlungsräume komplex (Ruth und Coelho, 2007): neben Auswirkungen auf Menschen und Gebäude gilt es unter anderem Auswirkungen auf Infrastrukturen, Ver- und Entsorgungsservices, städtische Grünräume sowie Stoffströme zwischen Siedlungen und ihrem Umland zu beachten. Für Österreich liegen klare Hinweise vor, dass es klimabedingt zu einer Reduktion des Energiebedarfs für Raumwärme, einer Erhöhung des Energiebedarfs für Raumkühlung, einer Verstärkung städtischer Wärmeinseln und Hitzewellen sowie kleinräumigen Beeinträchtigungen der Trinkwasserentstehung kommen wird. Aussagen darüber, ob der Klimawandel die Gefährdung von Siedlungsräumen durch Hochwasser bzw. Starkwinde erhöht oder zur Verstärkung städtischer Ozon- und / oder Feinstaubbelastungen beiträgt, sind nur bedingt bis gar nicht möglich.

6.6.1 Siedlungsräume als Schauplätze des Klimawandels

Aufgrund der unterschiedlichen klimatischen, ökologischen, kulturellen, gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen werden unter dem Begriff „Siedlungsraum" unterschiedliche Ausprägungen menschlicher Siedlungen zusammengefasst. Die Spannweite reicht dabei in Österreich von strukturschwachen, peripher gelegenen alpinen Siedlungen bis zur Wiener Innenstadt (Höferl und Jelinek, 2007). Ein Großteil der Bevölkerung (ca. 65 %) lebt in urban geprägten Stadtregionen, weitere 15 % der Bevölkerung leben außerhalb dieser Zonen in zusammenhängend verbauten Gebieten (Abbildung 6.16). Die restlichen 20 % der Bevölkerung verteilen sich auf ländliche Siedlungsräume (Statistik Austria, 2013).

Je Siedlung nehmen die eingangs erwähnten Rahmenbedingungen auf unterschiedliche Art und Weise Einfluss auf die räumliche Entwicklung. Einwirkungen des Klimawandels stellen somit nur einen von vielen Einflussfaktoren der Siedlungsentwicklung dar. Es ist also davon auszugehen, dass die in weiterer Folge dargestellten Auswirkungen des Klimawandels in den Siedlungsräumen Österreichs zu unterschiedlichen Konsequenzen führen werden.

Die Auswirkungen des Klimawandels auf Siedlungsräume liegen dabei quer zu der für diesen Bericht charakteristischen sektoriellen Betrachtungsweise. Der Klimawandel beeinflusst nicht nur Menschen und Gebäude in Siedlungen, sondern auch städtische Infrastrukturen und deren Ver- und Entsorgungsservices, städtische Grün- und Freiräume, Stoffströme zwischen Siedlungen und ihrem Umland sowie letztlich auch Interaktionen zwischen diesen Elementen (Ruth und Coelho, 2007). Zu diesem komplexen Wirkungsgefüge Klimawan-

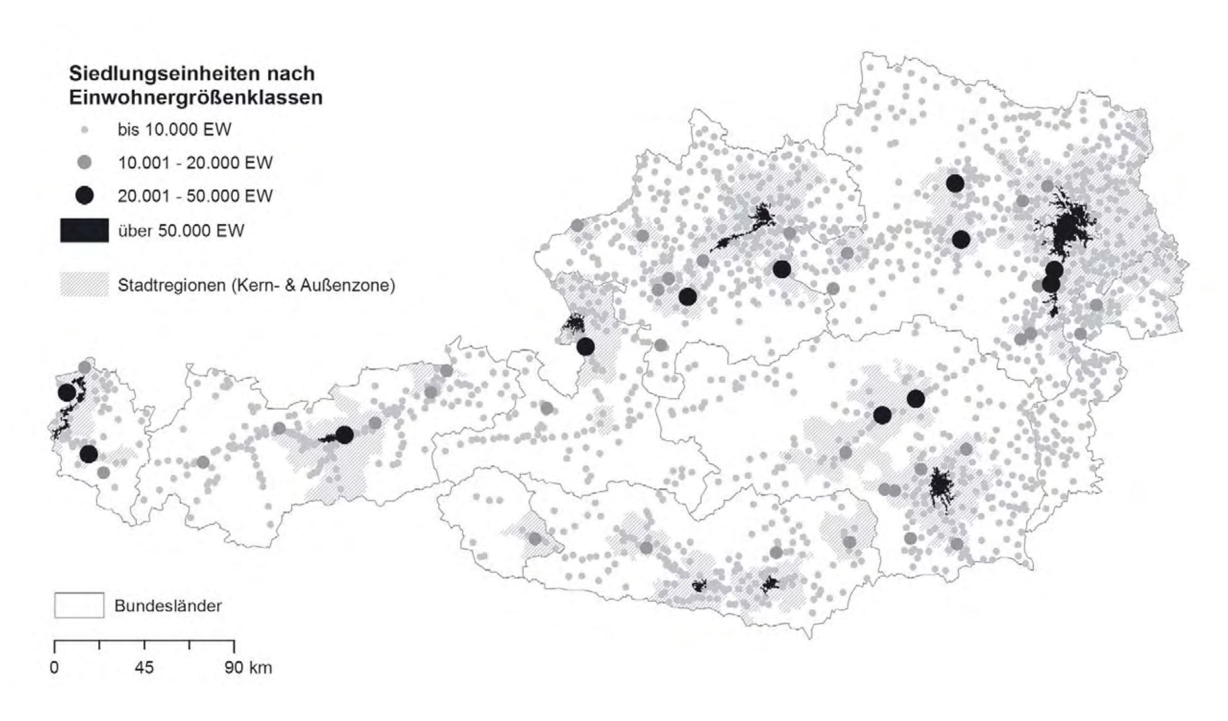


Abbildung 6.16 Siedlungsräume in Österreich. Datengrundlagen: Statistik Austria (2011)
Figure 6.16 Residential areas in Austria. Data source: Statistik Austria (2011)

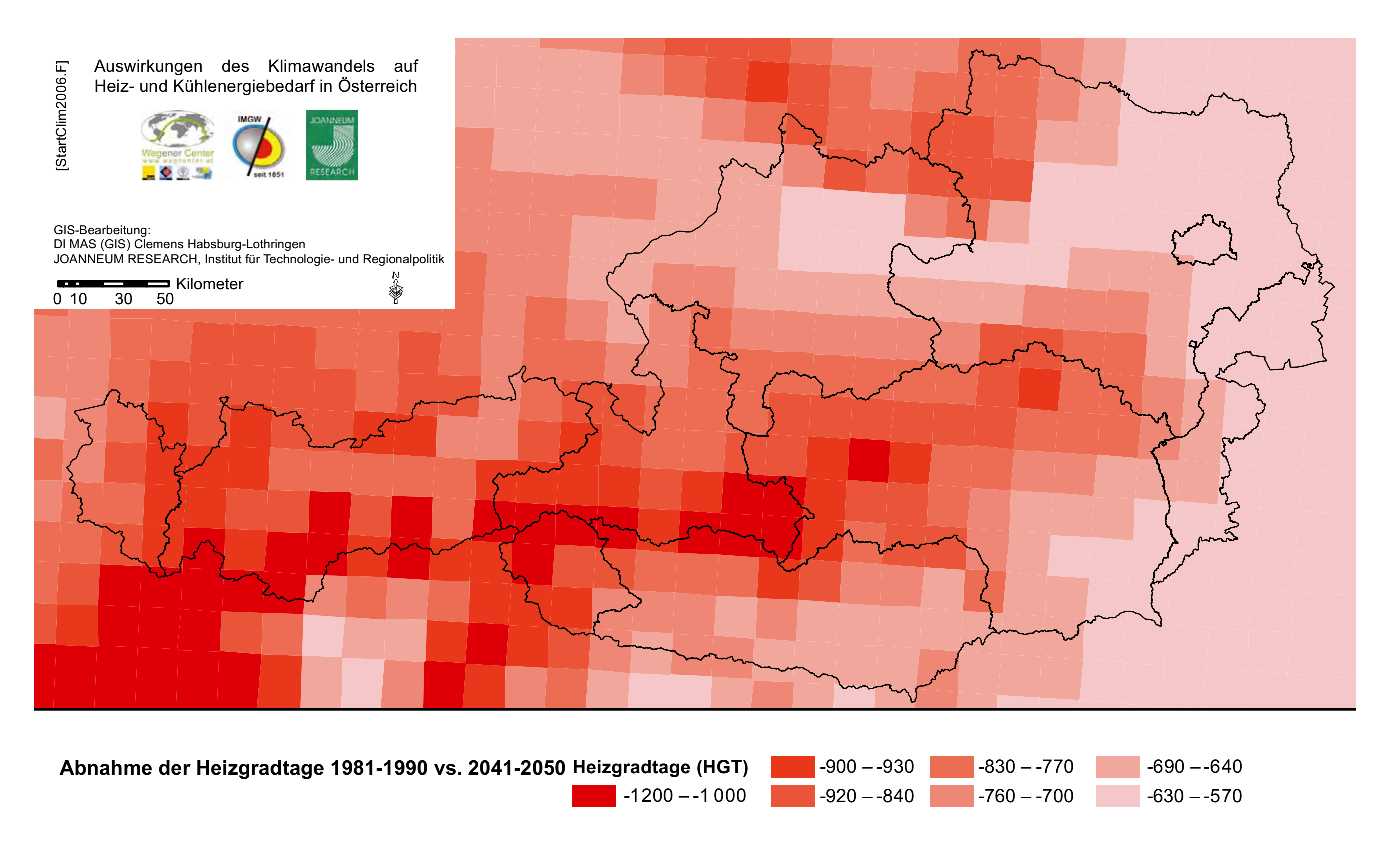


Abbildung 6.17 Abnahme der Heizgradtage 2041–2050 gegenüber 1981–1990. Quelle: Prettenthaler et al. (2008b)
Figure 6.17 Reduction of heating days 2041–2050 compared to 1981–1990. Source: Prettenthaler et al. (2008b)

del und Siedlungsraum liegen national sowie international erst wenige systematische Untersuchungen vor (z. B. Kuttler, 2011; Rosenzweig et al., 2011; OECD, 2010; IPCC, 2007). Die inhaltliche Gliederung dieser Untersuchungen diente als Vorlage der hier getroffenen Auswahl von Auswirkungen des Klimawandels auf österreichische Siedlungsräume.

6.6.2 Auswirkungen auf den Heiz- und Kühlbedarf

Gobiet et al. (2007) kommen zum Schluss, dass Österreich bis 2050 ein Temperaturanstieg von ca. 0,4 °C je Jahrzehnt bevorsteht. Die reclip:century-Simulationen lassen noch höhere Temperaturanstiege erwarten: im Winter bis 2,2 °C, im Sommer bis 2,5 °C (Loibl et al, 2011a). Diese Temperaturanstiege bilden gemeinsam mit den eingesetzten Heiz- und Kühltechnologien sowie der Energieeffizienz von Gebäuden die zentralen Bestimmungsfaktoren des Energiebedarfs von Siedlungsräumen (Gobiet et al., 2008).

Prettenthaler et al. (2008b) nutzen VERACLIM-Ergebnisse (Gobiet et al., 2008) um die klimabedingten Veränderungen von Heiz- und Kühlgradtagen abzuschätzen. Heiz- und Kühlgradtage stehen dabei vereinfacht für die Temperaturdifferenz zwischen einem Heiz- bzw. Kühlschwellenwert und dem Tagesmittel der Außentemperatur. Die zwischen den Perioden 1981 bis 1990 und 2041 bis 2050 ermittelte Veränderung der Heizgradtage (Abbildung 6.17) fällt dabei in alpinen Räumen Westösterreichs deutlich höher aus, als in den östlichen Niederungen (Töglhofer et al., 2007). Österreichweit kann im Vergleichszeitraum 1981 / 1990 bis 2041 / 2050 mit einer durchschnittlichen Reduktion der Heizgradtage um ca. 20 % gerechnet werden (Prettenthaler et al. 2007).

Die für denselben Vergleichszeitraum ermittelte Veränderung der Kühlgradtage zeigt österreichweit einen signifikanten Anstieg (Abbildung 6.18): Mit einer absoluten Zunahme von 200 und mehr Kühlgradtagen weisen Niederösterreich, Wien, die Südoststeiermark sowie das Südburgenland die größten Zuwächse bis 2050 auf (Töglhofer et al., 2007). Die absolute Zunahme ist somit in jenen Gebieten am stärksten, welche bereits in der Periode 1981 bis 1990 die meisten Kühlgradtage aufwiesen. Österreichweit kann im Vergleichszeitraum 1981 / 1990 bis 2041 / 2050 mit einer Erhöhung der Kühlgradtage zwischen 130 und 147 % gerechnet werden (Prettenthaler et al., 2007).

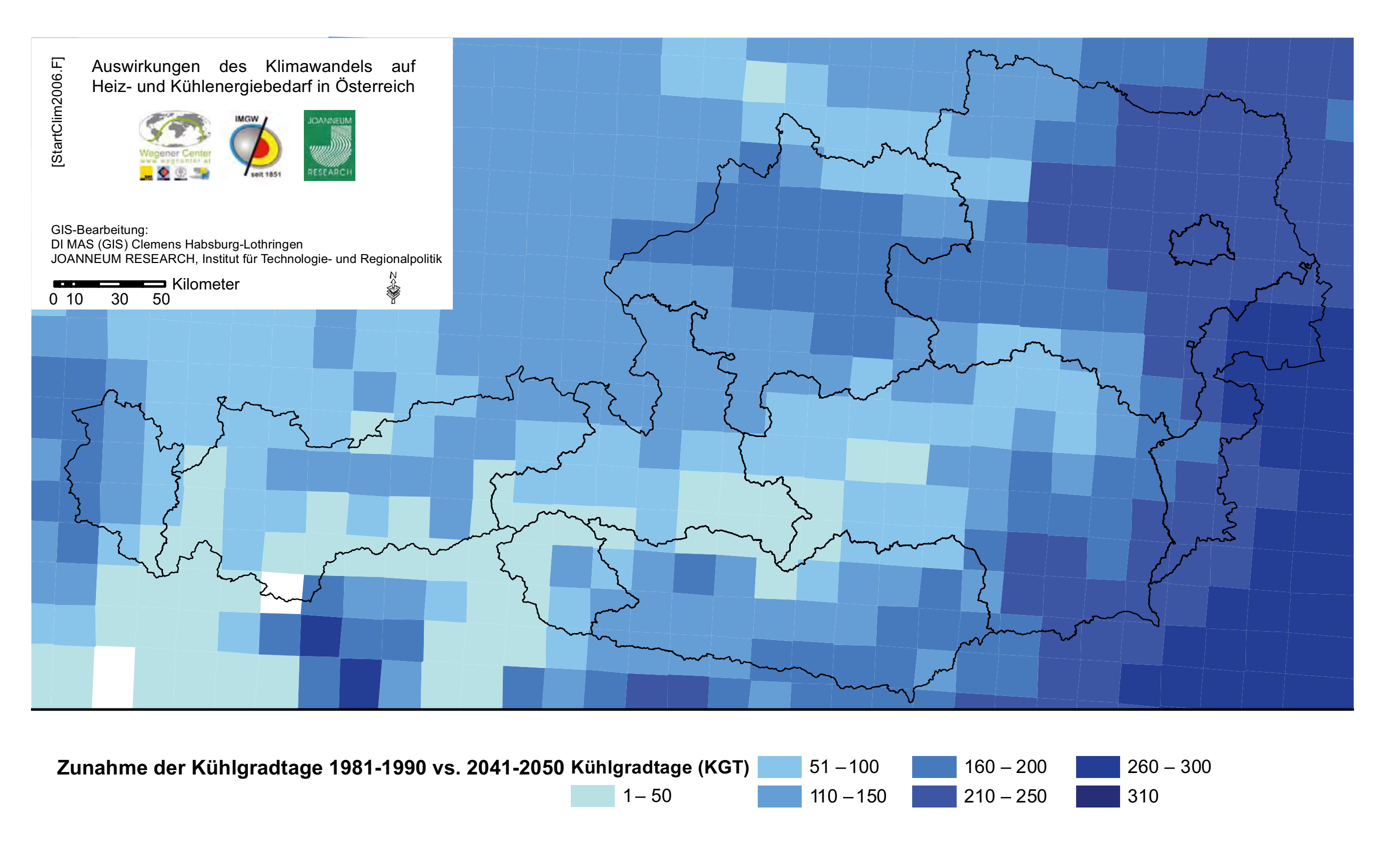


Abbildung 6.18 Zunahme der Kühlgradtage 2041–2050 gegenüber 1981–1990. Quelle: Prettenthaler et al. (2008b)

Figure 6.18 Increase of cooling days 2041–2050 compared to 1981–1990. Source: Prettenthaler et al. (2008b)

Die von Prettenthaler et al. (2007) exemplarisch für Wien und Lienz durchgeführte Überlagerung von Höhenlage und den Veränderungen der Heiz- und Kühlgradtage zeigt, dass Siedlungsräume im Alpenraum klimatisch begünstigt werden: Werden in 650 m Seehöhe 10 Heizgradtage durch einen Kühlgradtag ersetzt, beträgt dieses Substitutionsverhältnis in 100 m Seehöhe nur mehr 2:1 (Gobiet et al., 2008). Berücksichtigt man die Siedlungsstruktur Österreichs – mehr als die Hälfte der ÖsterreicherInnen lebt unter 500 m Seehöhe – werden österreichweit bis 2050 3,9 Heizgradtage durch einen Kühlgradtag ersetzt.

Die Auswirkungen der klimabedingten Veränderungen der Heiz- und Kühlgradtage auf den Energiebedarf sind für Heizung und Kühlung deutlich unterschiedlich. Prettenthaler et al. (2007, 2008b) schätzen ohne Berücksichtigung energetischer Sanierung und technischer Neuerungen die klimabedingte Reduktion des jährlichen Endenergiebedarfs für Raumwärme für die Periode 1981 / 1990 bis 2041 / 2050 auf 10 800 GWh. Prettenthaler et al. (2008b) gehen jedoch davon aus, dass technische und sozioökonomische Entwicklungen (Effizienzsteigerungen) einen vermutlich größeren Einfluss auf den zukünftigen Energieverbrauch aufweisen werden. Dies bestätigen Kranzl et al. (2011), indem sie die bis 2050 zu erwartende klimabedingte Reduktion im Energieverbrauch für Raumwärme je nach Klimaszenario mit 3–6 % sowie die durch effiziente Neubauten und Bestandssanierung erzielbare Reduktion mit ca. 57 % ermitteln. Zusätzlich kommen Prettenthaler et al. (2007) zum Schluss, dass trotz der klimabedingten Gesamtreduktion der Heizenergiebedarf dünnbesiedelter Räume (≤ 10 Wohnungen / km²) 2050 ca. doppelt so hoch wie jener von Ballungsgebieten (> 999 Wohnungen / km²) ausfallen wird.

Wie sich das Ansteigen der Kühlgradtage auf den Energieverbrauch niederschlagen wird, hängt von wenig vorhersehbaren technischen (z. B. Reduktion des Kühlbedarfs an Gebäuden) und vor allem sozioökonomischen, verhaltensspezifischen (z. B. Trend zur Klimatisierung) Entwicklungen ab (Kranzl et al., 2011; Prettenthaler et al., 2008b). Kranzl et al. (2011) prognostizieren als Maximal-Szenario einen Anstieg des Energieverbrauchs zur Raumkühlung von ca. 500 GWh 2001 (Adnot et al., 2003) auf 9 700 GWh 2050, was der gesamten Österreichischen Spitzenstromlast im Winterhalbjahr 2009 entspräche. Studien zu möglichen stadtklimatischen Auswirkungen dieses künftigen Kühlbedarfs für Österreich –

wie z. B. die Verstärkung städtischer Wärmeinseln durch die Abwärme von Kühlaggregaten – sind derzeit erst in Arbeit.

Zusammenfassend belegen die für Österreich vorhandenen Studien, dass der klimabedingte Temperaturanstieg zu einer Reduktion des Gesamtenergiebedarfs beiträgt. Dabei übersteigt die klimabedingte Einsparung von Heizenergie den zusätzlichen Energiebedarf zur Raumkühlung um ein Vielfaches (Prettenthaler et al., 2008b). Allerdings herrscht Übereinstimmung darin, dass kommende technologische und gesellschaftliche Entscheidungen wesentlich stärker Einfluss auf den Energiebedarf für Heizen und Kühlen nehmen werden als der klimabedingte Temperaturanstieg (Kranzl et al., 2011; Prettenthaler et al., 2008b).

6.6.3 Auswirkungen auf städtische Wärmeinseln

Bereits in den 1970er Jahren wurde die übermäßige Erwärmung städtischer Kernzonen im Vergleich zu deren Umland unter dem Begriff „städtische Wärmeinsel" zusammengefasst (Loibl et al., 2014). In diesen Kernzonen können – ohne Berücksichtigung des Klimawandels – um bis zu 9 bis 10 °C höhere Temperaturen als in der offenen Umgebungslandschaft gemessen werden (Kuttler, 2011). Höhere Temperaturen infolge des Klimawandels führen besonders in dicht bebauten Kernbereichen städtischer Agglomerationen zu einer Verstärkung solcher Wärmeinseln.

In urbanen Kernzonen ist mit einer intensiveren Steigerung der Hitzetage (Maximaltemperatur ≥ 30 °C) zu rechnen. Für Wien errechneten Moshammer et al. (2006) eine kontinuierliche Steigerung der Zahl der Hitzetage von 17 bis 20 Hitzetage / Jahr in der Periode 2010 bis 2039 auf 37 bis 40 Hitzetage / Jahr in der Periode 2061 bis 2090 (siehe auch Band 1, Kapitel 4). Zuvela-Aloise et al. (2012) stützen diese Einschätzung anhand des Stadtklimamodells MUKLIMO_3; sie gehen für den Zeitraum 2021 bis 2050 von einer moderaten, für den Zeitraum 2071 bis 2100 von einer markanten Zunahme der Sommertage (Maximaltemperatur ≥ 25 °C) in Wien aus.

Als eine Folge von längeren Hitzeperioden (und geringerer Durchlüftung) zeigen städtische Gebiete eine geringere nächtliche Abkühlung. Gerersdorfer et al. (2006) ermittelten in der Periode 1961 / 1990 bis 1985 / 2002 für die meisten Messstationen des österreichischen Klimaatlas mindestens eine Verdoppelung der Anzahl warmer Nächte (≥ 18 °C). Klimaszenarien für die nächsten 20 bzw. 50 Jahre lassen einen weiteren Anstieg der Häufigkeit hoher nächtlicher Temperaturen in städtischen Gebieten als realistisch erscheinen (vgl. Loibl et al, 2011b). Für die Station Graz-Universität ist laut Gerersdorfer et al. (2006) – ausgehend von der Referenzperiode 1961 bis 1990 mit 4,5 warmen Nächten / Jahr – ein Anstieg auf 15,1 Nächte / Jahr für die Periode 2019 bis 2048 zu erwarten.

Das zeitliche Ineinandergreifen von Hitzetagen und warmen Nächten führt zu „Hitzeperioden", also zu längeren Zeiträumen mit erheblicher Wärmebelastung. Kombiniert mit einer zunehmend alternden Bevölkerung können diese Hitzeperioden in urbanen Kernzonen zu einer deutlichen Steigerung gesundheitlicher Beeinträchtigungen führen. (vgl. dazu auch Abschnitt 6.1).

Eine Generalisierung des Phänomens städtischer Wärmeinseln erweist sich jedoch schwierig, da dessen lokale Ausprägung unter anderem von der jeweiligen topologischen und klimatologischen Situation abhängt. Z. B. treten aufgrund des nächtlichen Kaltluftabflusses an Hängen in Tal- und Beckenlagen warme Nächte weniger häufig auf als im ostösterreichischen Flachland (Gerersdorfer et al., 2006). Darüber hinaus können unterschiedliche Siedlungs- und Freiraumstrukturen zu einer Verstärkung bzw. Abschwächung städtischer Wärmeinseln beitragen (Loibl et al, 2010; Loibl et al., 2011b; Stiles et al., 2013; Loibl et al, 2014; Erell et al., 2011; Bowler et al., 2010). Studien in Österreich widmen sich erst ansatzweise der Frage, ob städtische Freiraumstrukturen, deren Pflegeaufwand sowie das NutzerInnenverhalten durch eine mögliche Steigerung der Wärmebelastung beeinflusst werden. Die vorliegenden Studien (Drlik et al, 2011; Drlik, 2010; Drlik und Licka, 2010) lassen eine klimatische Verstärkung des Hitzestresses bei Parkpflanzen, eine Erhöhung des Pflegeaufwands sowie merkliche Veränderungen des NutzerInnenverhaltens (z. B. Präferenzen für schattige und kühle Ruhebereiche) vermuten. Welche Auswirkungen eine erhöhte städtische Wärmebelastung auf die Luftgüte – hier vor allem die Belastung mit Feinstaub und Ozon – haben kann, lässt sich zum Stand 2013 nicht mit Sicherheit abschätzen (Krüger et al., 2009).

6.6.4 Auswirkungen auf die Hochwassergefährdung von Siedlungsräumen

Wie keine andere Naturgefahr verursach(t)en Hochwasser große finanzielle Schäden in den Siedlungsräumen Österreichs. Alleine die Hochwasserereignisse 2002 entlang des Kamps führten zu einem geschätzten Sachschaden von ca. 3,1 Mrd. € (ZENAR, 2003). Die von Prettenthaler et al. (2008b) durchgeführte Schätzung der Verkehrswerte hochwassergefährdeter Wohnimmobilien zeigt deutlich, dass Salzburg, Tirol und Vorarlberg signifikant höhere Wertkonzentrationen im Abflussbe-

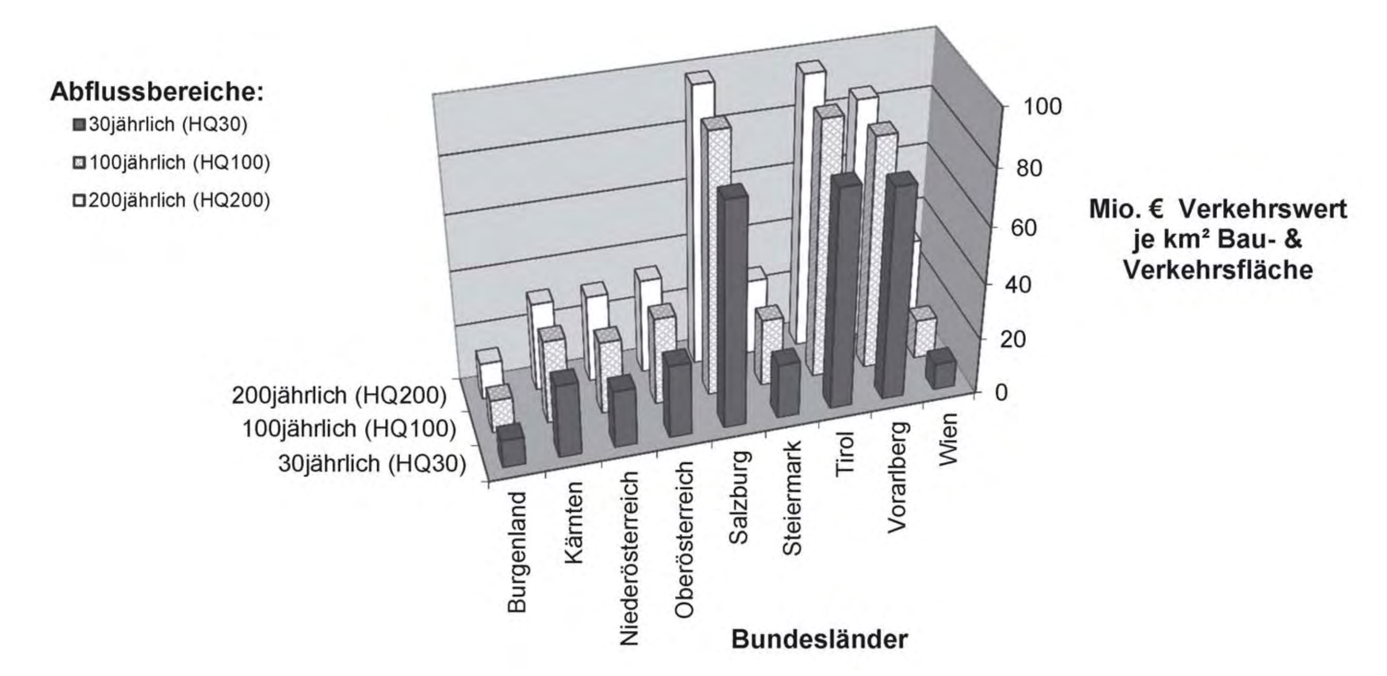


Abbildung 6.19 Verkehrswerte hochwassergefährdeter Wohnimmobilien je km² Bau- und Verkehrsfläche sowie Bundesland. Quelle: Höferl (2010)

Figure 6.19 Market values of flood-prone residential buildings per km² settlement and infrastructure area. Source: Höferl (2010)

reich von Hochwassern aufweisen als die östlichen Bundesländer (Abbildung 6.19).

Ob diese bestehende Gefährdung von Siedlungsräumen sich durch den Klimawandel weiter verschärfen wird, gilt momentan als unsicher. Große Übereinstimmung besteht darin, dass die bestehenden Abflusszeitreihen und Simulationsmodelle die Identifikation positiver oder negativer klimabedingter Trends nicht ermöglichen (Blöschl et al., 2011; Blöschl et al., 2009; Böhm et al., 2008). Prognosen zur Veränderung der Häufigkeit und Intensität von Hochwassern sind momentan mit großen Unsicherheiten verbunden. Auf Basis meteorologischer und physikalischer Veränderungen getroffene Vermutungen über eine klimabedingte Verstärkung von „Einflussfaktoren" für Hochwasserereignisse (Formayer und Kromp-Kolb, 2009b) werden vor allem von VertreterInnen der Wasserwirtschaft (Blöschl et al., 2011) als spekulativ eingeordnet. Vor dem Hintergrund einer Verschiebung der Niederschläge von Sommer und Herbst in Richtung Winter und Frühjahr (Loibl et al., 2011a) deuten anhand von Klimaszenarien durchgeführte Studien (ein Überblick findet sich in BMLFUW, 2011) für den Zeitraum bis 2050 die Möglichkeit regional unterschiedlicher Entwicklungen bei Hochwasserabflüssen (–4 bis +10 %) an. Nahezu alle dieser Studien bestätigen dabei jedoch, dass die natürlichen Schwankungen der Hochwasser wesentlich größer als die prognostizierten Änderungen aufgrund des Klimawandels ausfallen (BMLFUW, 2011).

Die bisherigen Ausführungen behandeln jedoch rein das Gefahren-, nicht aber das Schadenspotential von Hochwasserereignissen in Siedlungsräumen. Erst eine Zusammenschau der zukünftigen Entwicklung des Gefahrengebiets sowie des zukünftigen Siedlungsraums (Abbildung 6.20) würde eine valide Aussage zur möglichen Betroffenheit von Siedlungsräumen durch intensivere bzw. häufigere Hochwasser erlauben.

Solch integrative Untersuchungen liegen für Österreich nicht vor. Es ist aber davon auszugehen, dass die Entwicklung des Siedlungsraums – und damit des Schadenspotentials – einer deutlich stärkeren Dynamik unterworfen ist, als die Beeinflussung der Häufigkeit und / oder Intensität von Hochwassern durch den Klimawandel (Fuchs, 2008; Stötter, 2007). Nichtsdestotrotz ist es notwendig, mögliche klimawandelbedingte Änderungen der Hochwassergefährdung mit in die Planung einzubeziehen, um das Schadenspotenzial reduzieren zu können.

6.6.5 Auswirkungen auf Nutzungs- und Bedarfsaspekte der Siedlungswasserwirtschaft

Die nicht gesicherte Wasserversorgung von Siedlungsräumen zählt global betrachtet zu einer der gravierendsten Auswirkungen des Klimawandels (Rosenzweig et al., 2011; OECD, 2010). Obwohl in Österreich momentan nur ca. 3 % des erneuerbaren Wasserangebots direkt genutzt werden, kann es kleinräumig

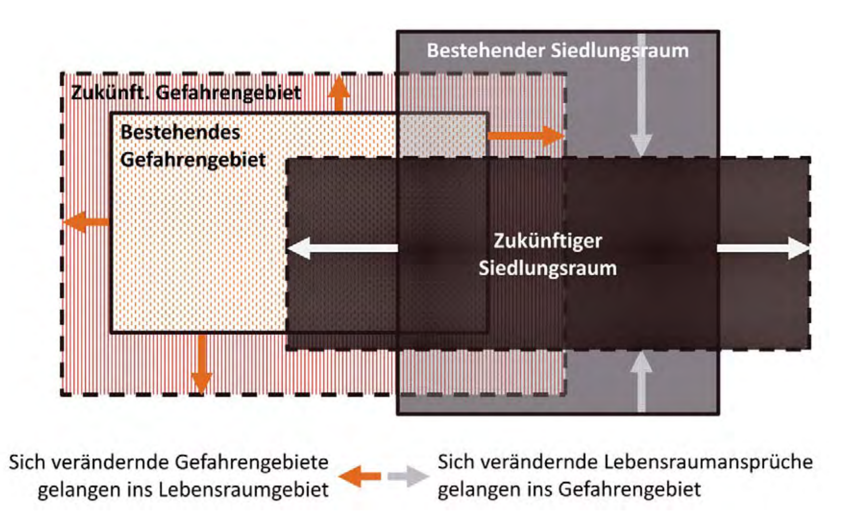


Abbildung 6.20 Siedlungsraum und Gefahrengebiet im zeitlichen Wandel. Eigene Überarbeitung von ARE, 2005. Quelle: Auszug Richtplan des Kantons Graubünden, CH, (2009)

Figure 6.20 Settlement area and danger areas over time. Adapted from ARE, 2005. Source: extract of Richtplan of the Graubünden canton, CH, (2009)

zu Engpässen bei der Bedarfsdeckung kommen (BMLFUW, 2011; Rogler et al., 2011). Aus dem Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher Klimaszenarien auf den Wasserhaushalt kann jedoch ein klimabedingter Mangel an Wasser in Österreich ausgeschlossen werden (Blöschl et al., 2011; Blaschke et al., 2011). Für die bestehenden lokalen und regionalen Versorgungseinheiten in Ungunstlagen (geologische Gegebenheiten, geringe Pufferung und Vernetzung etc.) wird eine quantitative sowie qualitative Beeinträchtigung der Trinkwasserversorgung durch den Klimawandel nicht ausgeschlossen (BMLFUW, 2011). Vor diesem Hintergrund wird vor allem der regionalen Vernetzung kleiner ländlicher Versorgungseinheiten in Zukunft eine steigende Bedeutung beigemessen.

Für die Bewässerung privater und öffentlicher Gärten wird mit einer regional unterschiedlich ausgeprägten Zunahme gerechnet (BMLFUW, 2011). Systematische Studien zu Auswirkungen des Klimawandels auf die Bewirtschaftung und Bewässerung städtischer Frei- und Grünräume liegen bislang für Österreich nicht vor. Drlik (2010) zeigt jedoch anhand einer Studie zur Wahrnehmung des Klimawandels durch Beschäftigte kommunaler Gartenbauämter auf, dass unter Bedingungen des Klimawandels der Sicherung der Bewässerung von Freiflächen eine zentrale Rolle zugeordnet wird.

Im Bereich der Abwasserentsorgung könnte der Klimawandel – vor allem im Nordosten Österreichs – durch häufigere Niederwasserereignisse sowie höhere Wassertemperaturen neue Anforderungen an die Reinigungsleistung von Kläranlagen begründen (Böhm et al., 2008).

6.6.6 Auswirkungen durch Starkniederschläge

Starkniederschläge können in Form von Starkregenereignissen neben der temporären Überlastung städtischer Kanalnetzte auch zur lokal beschränkten Überflutung von Erd- und Untergeschoßen („urban flash floods“) oder der Beschädigung ortsfester Infrastrukturen führen (ÖROK, 2010). Letzterer Punkt kann auch mit kurz- bis mittelfristigen Ausfällen öffentlicher Dienstleistungen (z. B. im Nahverkehr) einhergehen. Ob der Klimawandel zu einer Zunahme von Starkniederschlagsereignissen beiträgt, kann zurzeit nicht eindeutig beantwortet werden. Große Übereinstimmung besteht dahingehend, dass bisherige Simulationsmodelle aufgrund ihrer groben räumlichen Auflösung keine belastbaren Aussagen zur Veränderung der Häufigkeit und / oder Intensität lokaler Starkniederschläge zulassen (Böhm, 2008; Suklitsch et al., 2007). Zeitgleich findet sich in Studien (z. B. Loibl et al., 2009, 2011a, ÖROK, 2010) die übereinstimmende Einschätzung, dass mit einer Zunahme von Starkregenereignissen zu rechnen sei.

Bedingt durch eine klimabedingte Abnahme der Gesamtniederschläge in Sommer und Herbst sowie einer Zunahme in Winter und Frühjahr (Loibl et al., 2009, 2011a) können auch winterliche Starkniederschläge für Siedlungsräume relevant werden. Ergebnisse eines Forschungsprojekts weisen für das Bundesland Salzburg einen signifikanten Anstieg winterlicher Starkniederschlagsmengen aus (Amt der Salzburger Landesregierung, 2011). Diese Zunahme kann zu höheren Schneelasten führen, welche vor allem bei Gebäuden mit großen Spannweiten Schäden verursachen können (OcCC, 2007).

Auch Hagelereignisse können in Siedlungsräumen zu beachtlichen Schäden führen. Vor allem Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel (z. B. Sonnenblenden an Hausfassaden) sowie zum Klimaschutz (z. B. auf Hausdächern angebrachte Photovoltaik-Paneele) können durch Hagelstürme geschädigt werden (OcCC, 2007). Belastbare Aussagen zu einer möglichen klimabedingten Zunahme von Hagelstürmen in Häufigkeit und / oder Intensität sind nur sehr bedingt bis gar nicht

möglich (Böhm, 2008; Rudel, 2008) (vgl. Band 1, Kapitel 4).

Mögliche Änderungen der Gefährdung durch Muren, Hangrutschungen und / oder Lawinen sind noch mit großer Unsicherheit behaftet (vgl. Abschnitt 6.5).

6.6.7 Auswirkungen auf die Gefährdung von Siedlungsräumen durch Starkwinde

Starkwindereignisse können in Siedlungsräumen zum Windwurf von Bepflanzungen, dem „Abdecken" von Hausdächern sowie zur Beschädigung von Gebäuden, Verkehrs- und Infrastruktureinrichtungen führen. Alle diese Auswirkungen können zu einer direkten Gefährdung von Personen führen. Es besteht große Übereinstimmung, dass hinsichtlich einer möglichen Veränderung der Häufigkeit und / oder Intensität von Starkwindereignissen durch den Klimawandel keine statistisch gesicherten Trends erkennbar sind (Gobiet und Truhetz, 2008; Rudel, 2008; Pfister, 2003). Trotz dieser Übereinstimmung findet sich in einer Vielzahl von Studien (z. B. Seiler, 2006; Jonas et al., 2005; Leckebusch und Ulbrich, 2004) die Vermutung, dass eine Erhöhung der Frequenz und Intensität von Starkwindereignissen durch den Klimawandel wahrscheinlich sei (siehe auch Abschnitt 6.5.4). Untersuchungen über Auswirkungen einer erhöhten Häufigkeit und / oder Intensität von Starkwinden auf Siedlungsräume sowie den Wind-Komfort in Siedlungen liegen momentan für Österreich nicht vor.

6.7 Auswirkungen des Klimawandels auf die technische Infrastruktur
6.7 Climate change impacts on technical infrastructure

Insbesondere liniengebundene Infrastrukturen sind den Wetterbedingungen stark ausgesetzt. Ihre Beschädigung zieht direkte Kosten für die Instandsetzung nach sich. Oftmals entstehen jedoch durch Serviceunterbrechungen für Energie und Transport weitaus größere indirekte Kosten. Bereits heute entstehen massive Schäden und damit verbundene Kosten im Bereich der öffentlichen Infrastrukturen, sodass man von einem bestehenden Anpassungsdefizit ausgehen muss. Die sich abzeichnenden Klimatrends für die meisten entscheidenden Schadensauslöser lassen einen Anstieg der Schäden und damit der direkten und indirekten Kosten für die öffentlichen Infrastrukturen und die von Ihnen abhängigen Services befürchten.

Naturereignisse als Auswirkung von Extremereignissen und deren künftige Entwicklung wurden in Abschnitt 6.5 erläutert. Hier werden deren Folgeschäden auf die Infrastruktur besprochen.

6.7.1 Exposition und Schadenssensitivität von Infrastrukturen

Energie- und Verkehrsinfrastrukturen weisen durch ihre exponierte Lage und orographisch komplexe Netzstruktur (bei den Energieversorgungsnetzen sowie Schienen- und Straßenverkehrsnetzen) eine hohe Exposition gegenüber Wetterfolgen auf. Klimaänderungen sind die Summe aller Wetter- und Witterungserscheinungen und damit bewirken klimatische Änderungen auch eine Änderung der Exposition gegenüber extremen Wetter- und Witterungserscheinungen. Eine Unterbrechung an einer Stelle kann oftmals zu weitflächigen Serviceausfällen bei der Energieversorgung respektive bei Mobilität / Transport führen. Daher ist auch die Sensitivität als hoch einzustufen. Klimafolgen auf Infrastrukturen und Services waren daher schon in der Vergangenheit häufig – es besteht somit ein Anpassungsdefizit –, weshalb eine sorgfältige Bestandsaufnahme und Auswertung von aufgetretenen Schadensereignissen wesentlich ist, um Zusammenhänge zwischen Klimafaktoren und Schadensereignissen zu erkennen und somit gegenüber sich ändernden Klimabedingungen gewappnet zu sein.

Die Auswertung bisheriger Schadensereignisse zeigt deutlich, dass niederschlagsbedingte Schadensereignisse den bei weitem höchsten Anteil bei Schäden an der Verkehrsinfrastruktur in Österreich ausmachen (näheres in Abschnitt 6.7.2). Klimabedingte Schäden an der Energieinfrastruktur sind in Österreich bislang noch nicht systematisch ausgewertet worden, generell ist aber davon auszugehen, dass auch in Österreich speziell im Mittel- und Niederspannungsnetz (Verteilernetz) ein Hauptteil der Schäden geschieht, die entsprechend zu Stromausfällen führen (Martikainen et al., 2007 für Finnland). Hier sind oftmals die Nähe zu rutschenden Hängen, windwurfgefährdeten Bäumen sowie die bauliche Ausführung (z. B. mit Holzmasten) entsprechende Schadensauslöser. Österreich steht allerdings derzeit im europäischen Vergleich mit rund 30 Minuten durchschnittlicher jährlicher Stromausfallzeit (CEER, 2008) sehr gut da, sodass die Stromnetze (insbesondere das Hoch- und Höchstspannungsnetz ab 110 kV) derzeit noch als weitgehend sicher angesehen werden können.

Einige dieser Aspekte werden in derzeit laufenden ACRP-Forschungsprojekten näher beleuchtet, während auf europäischer Ebene in einem Forschungsprojektcluster zumindest der Verkehrssektor hinsichtlich Klimafolgen näher untersucht wird.

Zwischenergebnisse dieser Forschungsarbeiten: es sind kaum die graduellen Klimaänderungen, die negativ auf die In-

frastrukturen wirken, sondern vielmehr die wachsenden Häufigkeiten und Ausmaße von Extremereignissen und extremen Witterungsperioden, die Einfluss auf direkte Schäden / Kosten haben und durch Unterbrechungen der Services auch indirekte Schäden / Kosten nach sich ziehen. Analysen unveröffentlichter Schadensdaten in Österreich (ÖBB-Infrastruktur sowie Straßenschadensdaten der Bundesländer) zeigen: Die Exposition gegenüber klimabedingten Schäden an der liniengebundenen Infrastruktur von Straße, Schiene und Übertragungsnetzen ist vor allem dort besonders erhöht, wo

- die jährlichen Niederschlagssummen besonders hoch sind,
- Starkniederschläge besonders ausgeprägt sind,
- höhere Vegetation (Wald) durchquert wird und zudem
- die Sturmhäufigkeit und -stärke hoch ist (z. B. die Föhnsturmgebiete) oder
- die Nassschneedeposition überdurchschnittlich ist sowie
- die Gewittergefahr ausgeprägt ist.

Sowie außerdem, wo:

- die geologische Beschaffenheit zu Rutschungen neigt (Bsp. Flyschgebiete der Voralpen),
- das Relief steil oder zumindest hügelig ist,
- primär bei Straßen und Schienen: die Streckenführung auf dem Niveau der Tallage erfolgt (Überschwemmungsgefahr) und / oder
- eine Hanglage in Rutschungs- oder Felssturz-gefährdeten Gebieten gegeben ist.

6.7.2 Direkte und indirekte (Folge-)Schäden an der Verkehrsinfrastruktur

Direkte wetterbedingte Schäden an der Straßen- und Schieneninfrastruktur werden in Österreich vor allem durch folgende Ereignisse verursacht:

Hochwasser

Hochwasser verursachen vor allem durch Unterspülungen, Erosion und Treibgut direkte Schäden an der Infrastruktur (vor allem an Straßenbelag, Drainagen, Böschungen, Dämmen und Brücken). Länger anhaltende Überschwemmungen führen vor allem zu indirekten Schäden durch Serviceunterbrechungen.

Eine Vorhersage von klimawandelbedingten Effekten ist nur insoweit möglich, als deren Ursachen – eine höhere Frequenz und Amplitude von Starkregenereignissen sowie die zusätzliche Verbauung und Versiegelung der Landschaft – eine Zunahme von Hochwasserereignissen erwarten lassen. In Österreich haben vor allem die August-Hochwasser 2002 (vor allem im Osten) und 2005 (vor allem im Westen) und zuletzt das Frühjahrshochwasser 2013 massive Schäden nach sich gezogen.

Massenbewegungen (Muren, Hangrutschungen und Felsstürze)

Massenbewegungen verursachen sowohl hohe direkte Kosten durch Schäden an der Verkehrsinfrastruktur selbst (vor allem an Straßenbelag, Hangverbauungen, Schutzwäldern, Drainagen) als auch indirekte Folgekosten durch z. T. längerfristige Serviceunterbrechungen. Die Schäden sind lokal begrenzt. Eine Vorhersage von klimawandelbedingten Effekten ist nur insoweit möglich, als deren Ursachen – Rückgang des Permafrosts, höhere Frequenz und Amplitude von Starkregenereignissen, rasche Schneeschmelze gemeinsam mit häufigeren Frühjahrsniederschlägen – eine Zunahme von Muren und Hangrutschungen erwarten lassen. Muren und Hangrutschungen sind in Österreich sehr zahlreich und treten meistens nach entsprechenden Niederschlagsereignissen auf. Hangrutschungen treten vor allem in den Lockergesteinsarealen der Flysch- und Molassezone (Voralpen) auf, Muren hingegen im alpinen Festgestein. Durch Hangrutschungen geraten zum Teil ganze Dörfer ins Rutschen (vgl. etwa die Hangrutschung von Sibratsgfäll / Bregenzer Wald 1999).

Lawinen

Lawinen können im Extremfall zu ähnlichen Schäden führen, wie Muren oder Hangrutschungen. Auch Todesopfer sind hier oft zu beklagen, da Lawinenabgänge kaum Gelegenheit lassen, sich in Sicherheit zu bringen – wie etwa bei der Lawine von Galtür 1999 mit 38 Todesopfern. Vor allem die indirekten Folgeschäden oft beträchtlich. Ganze Talschaften sind oftmals für Tage von der Außenwelt abgeschnitten und müssen gegebenenfalls aus der Luft versorgt werden. Trendaussagen zur künftigen Entwicklung sind auf Basis der Klimamodellergebnisse derzeit kaum möglich.

Stürme

Sturmbedingte Schäden betreffen primär den Windwurf. Die daraus resultierenden Kosten entstehen zumeist durch Aufräumarbeiten (neben Schäden an Leitschienen oder Schil-

dern), vorwiegend entlang von Waldstrecken. Nur in sehr seltenen Fällen kommt es durch Stürme zu direkten Schäden etwa an besonders exponierten Brücken. Künftige Trends im Auftreten von Stürmen sind mit hohen Unsicherheiten behaftet. Die Winterstürme „Kyrill" (2007) und „Emma" (2008) etwa führten zu massiven Windwurf-Schäden an der Verkehrsinfrastruktur und zu langen Straßensperren wegen Aufräumarbeiten.

Schneedruck

Ein ähnliches Schadensspektrum wie bei Stürmen entsteht durch Schneedruck. Auch hier entstehen die meisten Schäden und Kosten durch Windwurf bzw. Aufräumarbeiten auf Waldstrecken. Schneedruck entsteht vornehmlich durch gut haftenden Nassschneefall und führt vor allem bei den elektrischen Verteilernetzen zu erheblichen Problemen (vgl. z. B. Stromausfälle in Osttirol und Kärnten im Februar 2014).

Da in milderen Wintern von einer höheren Nassschneedeposition auszugehen ist, sind im Zuge des Klimawandels regionale Zunahmen beim Schneedruck zu erwarten. Schneedruck kann außerdem Gebäudedächer zum Einsturz bringen, wie etwa der tragische Einsturz der Eislaufhalle in Bad Reichenhall 2006 zeigte. Dies kann gegebenenfalls auch Wartehallen, Bahnhofsgebäude und sonstige Dachkonstruktionen der Verkehrsinfrastruktur betreffen.

Weitere Schäden an der Infrastruktur entstehen durch Hagel, Hitze und Frost. Dabei sind viele Schäden in den Schadensdatenbanken der Bundesländer nicht erfasst, da deren Behebung oft unter die laufende Instandsetzung fällt. Frostaufbrüche und Hitzeschäden an der Asphaltdecke können kaum zeitlich eingeordnet und somit systematisch erfasst werden. Diese Form von Schäden fällt demnach unter die reguläre Wartung bzw. Erneuerung von Straßen(abschnitten). Im Juni 2013 sind etwa auf den Betonplattenabschnitten der A1 sowie auf etlichen Autobahnen in Süddeutschland massive Schäden aufgetreten, die vermutlich auf die sehr rasche Erwärmung im Juni 2013 zurückzuführen waren. Diese so genannten Blow-Ups treten nur auf alten Betonplattenabschnitten auf, während die normalen Asphaltabschnitte der Autobahnen von Spurrillenbildung betroffen sind.

Hitzebedingte Schäden sind klimawandelbedingt durch steigende Temperaturen vermehrt zu erwarten. Auch bei Hagel kann eine Zunahme angenommen werden, da die zumeist zugrunde liegenden konvektiven Niederschläge mit hoher Wahrscheinlichkeit zunehmen werden. frostbedingte Schäden hingegen werden künftig wahrscheinlich abnehmen.

Abbildung 6.21 zeigt die klimabedingten direkten Kostenfaktoren für die Straßeninfrastruktur:

- Schadenskosten durch Massenbewegungen (Vermurungen, Hangrutschungen, Lawinen) und Hochwasser werden zumeist durch Hangverbauungen, Schutzgalerien und Dämme zu vermeiden gesucht. Allein für Lawinenschutzverbauungen wurden im Land Salzburg im Jahr 2008 knapp 7 Mio. € aufgewendet. Tirol hat innerhalb der letzten 30 Jahre insgesamt rund 125 Mio. € für Lawinenschutzmaßnahmen aufgewendet.
- Für neue Straßenbauvorhaben werden künftig aller Voraussicht nach zusätzliche Mittel aufgewendet werden, um diese robuster im Sinne von „klima- und wetterfester" zu machen.



Abbildung 6.21 Zusammensetzung von Klimafolgen- und Anpassungskosten am Beispiel Straße. Eigene Darstellung

Figure 6.21 Costs of climate impacts and adaptation exemplified by road traffic. Own picture

- Schäden durch Schnee(last), Sturm und Windbruch sowie Hagel bestehen zumeist in höheren Aufwendungen für (Auf)räumarbeiten. Anteilsmäßig fallen diese Ausgaben wenig ins Gewicht, können jedoch zu signifikanten indirekten Folgekosten durch Serviceunterbrechungen führen.
- Hitze- oder frostbedingte Schäden können zu kürzeren (oder längeren) Erneuerungszyklen für die Straßenbelagsdecke führen. Hitzebedingte Schäden werden dabei künftig wohl zunehmen und gegebenenfalls zur Anwendung neuer Belagsmischungen führen, während künftige Trends bei Frostaufbrüchen kaum absehbar sind, da hier neben Temperaturveränderungen auch der Niederschlag bei kurzfristigen Temperaturabsenkungen unter den Gefrierpunkt eine bedeutende Rolle spielt. (Enei et al., 2011)

Speziell für die Schieneninfrastruktur muss auf die höhere Schadensrelevanz von Sturmereignissen hingewiesen werden, die durch Windwurf sowohl die Oberleitungen als auch die Schienen beschädigen können. Schneestürme wie auch extreme Hitze- und Kältewellen sorgen immer wieder für Ausfälle, etwa von Weichen. Die indirekten Folgeschäden können auch hier beträchtlich sein, da es sowohl zu Transportunterbrechungen und somit gegebenenfalls zu Produktionsausfällen in der verarbeitenden Industrie wegen Lieferverzögerungen kommt, als auch zu Unterbrechungen im Pendler- und Reiseverkehr. Betriebswirtschaftliche indirekte Folgeschäden für die Bahnunternehmen können auch durch so genannte „mode switches“ entstehen: Güter oder Personen weichen auf andere Verkehrsträger (z. B. Straße, Flugzeug) aus und wechseln gegebenenfalls nicht vollständig bzw. nur mit größerer Verzögerung zurück zur Bahn. Die Frage der indirekten Folgeschäden ist derzeit Gegenstand der Untersuchungen in laufenden ACRP-Forschungsvorhaben.

Direkte Schäden an der Infrastruktur im Luftverkehr sowie in der Binnenschifffahrt sind im Vergleich zu Straße und Schiene deutlich geringer, genauso wie deren wirtschaftliche Relevanz in Österreich. Hier stehen die wetterbedingten Serviceunterbrechungen im Vordergrund: So ist etwa für die Binnenschifffahrt die Eisbedeckung ein wesentlicher limitierender Klimafaktor im Winterhalbjahr. Für Österreich ist nach derzeitigem Kenntnisstand mit einem Rückgang der winterlichen Eisbedeckung der hier vor allem wesentlichen Donau zu rechnen. Die Sicherheit im Flugverkehr selbst (und weniger die Schäden an den dafür nötigen Infrastrukturen wie Flughäfen, Hangars etc.) hängt sehr stark von Flugwetter-Faktoren wie Windspitzen, Eisregen und (Schnee-)Stürmen sowie Sicht einschränkenden Faktoren (Nebel, Staub- und Sandstürme etc.) ab. Betroffen sind somit weniger die Infrastrukturen selbst als die sie nutzenden Betreiber (Binnenschiffer und Fluggesellschaften) durch entstehende Betriebsausfälle.

Eine europaweite Übersicht der Schadenskosten im Verkehrssektor (Abbildung 6.22) liefern Enei et al. (2011). Aus dieser geht hervor, dass die Kosten für die Verkehrsinfrastruktur mit Abstand den größten Anteil ausmachen.

6.7.3 Direkte und indirekte (Folge-)Schäden an der Energieinfrastruktur

Die Energieinfrastruktur besteht im Wesentlichen aus den Kraftwerken sowie der Netzinfrastruktur. Besonderes Augenmerk hinsichtlich Klimafolgen gehört dabei den Überlandleitungen, die – ebenso wie die Straßen- oder Schieneninfrastruktur – durch ihre oft exponierte Lage eine hohe Schädigungsexposition aufweist.

Die Kraftwerke selbst sind je nach Kraftwerkstyp sehr unterschiedlich sensitiv. Im Folgenden werden die potenziellen Klimafolgen für die Energieinfrastruktur kurz umrissen:

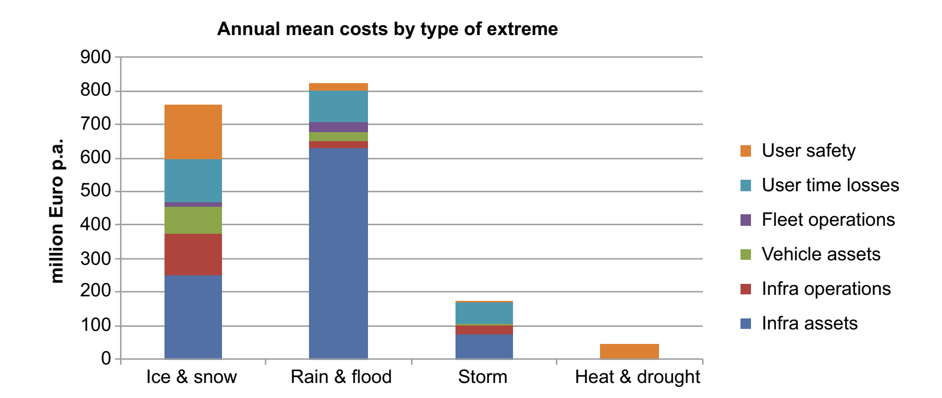


Abbildung 6.22 Schadenskosten im Verkehrssektor. Quelle: Enei et al. (2011)

Figure 6.22 Damage costs in the traffic sector. Source: Enei et al. (2011)

Direkte Gefährdungen der Übertragungsnetze (nur elektrische Übertragungsnetze, wenn nicht anders gekennzeichnet):

- Sturm sowie Schnee- und Eislasten stellen direkte Bedrohungen für die Überlandleitungen dar (Bonelli und Lacavalla, 2010).
- Während Hitzewellen ist die Durchleitungskapazität vermindert (gilt insbesondere auch für Gas, dessen Verbrauch im Sommer allerdings gering ist und hier primär für die Stromerzeugung genutzt wird) (vgl. Ebinger und Vergara, 2011).
- Durch Niederschläge ausgelöste Massenbewegungen stellen eine Bedrohung für Überlandleitungen dar (Williamson et al., 2009). Hier ist bei Netzplanungen vermehr Rücksicht auf besonders rutschungsgefährdete Hänge zu nehmen. Derzeit ist für die Bundesländer Burgenland, Niederösterreich und Steiermark bereits eine grobe Einstufung der Hangrutschungsneigung verfügbar (mündliche Mitteilungen Philip Leopold / AIT sowie Andreas Schindlmayr / geo2).
- Zurückgehender Permafrost kann durch vermehrte Felsstürze und -abbrüche Strommasten beschädigen und damit zu Leitungsunterbrechungen führen.

Leider sind wetterbedingte Versorgungsunterbrechungen in den öffentlich zugänglichen Ausfalls- und Störungsstatistiken (E-Control, 2011) nicht enthalten, da sie als „höhere Gewalt" nicht der Verantwortung der Netzbetreiber zugeschlagen werden. Direkte Gefährdungen der Kraftwerke:

- Viele thermische Kraftwerksanlagen befinden sich in unmittelbarer Flussnähe und sind damit einem größeren Hochwasserrisiko ausgesetzt.
- Wasserkraftwerke sind je nach Bautyp (Speicher- und / oder Laufkraftwerk) sowie Abflussregime (gletscher-, schnee- oder regengespeist) sehr unterschiedlich sensitiv. Starke Schwankungen in der Wasserführung bzw. in den Reservoirs stellen eine direkte Gefahr für die Wasserkraftwerke selbst dar und erfordern z. B. bei Speicherkraftwerken häufiges Spülen.
- Photovoltaikanlagen weisen durch ihre Standorte eine entsprechende Exposition und Sensitivität gegenüber extrem hohen Windlasten und starkem Hagelschlag auf.

Keine direkte Gefahr für die Kraftwerke selbst, jedoch relevant für deren Effizienz sind:

- schwankende Pegelstände und Abflüsse bei Wasserkraftwerken / Laufkraftwerken.
- Windgeschwindigkeiten für Windkraftanlagen. Bei sehr hohen Windgeschwindigkeiten stellt sich das Problem der Netzüberlastung und Abführung der erzeugten Energie, weshalb etwa in Deutschland Windparks bei hohen Windgeschwindigkeiten oft außer Betrieb gesetzt werden müssen.
- Bewölkung / Einstrahlung und Temperatur für Photovoltaik-Anlagen. Photovoltaik-Anlagen sind hinsichtlich ihrer Effizienz temperaturabhängig. So sind bei hohen Temperaturen Effizienzeinbußen von mehr als 10 % üblich.

6.7.4 Forschungsbedarf

Um potenzielle Klimawandelfolgen und weitere Folgewirkungen auf die Infrastruktur besser abschätzen zu können, ist Forschungsbedarf vor allem in vier Bereichen gegeben:

1. Belastbarere Projektionen von Niederschlagsextremereignissen sind nötig, da diese Art von Extremereignissen (Intensität und Dauer) den weitaus größten Anteil an Infrastrukturschäden ausmachen. Die gegenwärtigen Klimaprojektionen weisen hier jedoch noch große Unsicherheiten auf. Diese Probleme lassen sich jedoch zum Teil auch ganz pragmatisch lösen: So lassen sich etwa die Änderungen in der Auftrittswahrscheinlichkeit für bestimmte Ereignisse durchaus aus Klimamodellen indirekt ablesen: der einfachste Zusammenhang besteht etwa zwischen dem mittleren Monatsmaximum der Temperatur und der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Hitzetagen. Ähnliche Zusammenhänge beim Niederschlag erlauben eine Anpassung etwa von Jährlichkeiten und somit eine bessere Planungs- und Bemessungsgrundlage für den Bau von öffentlichen Infrastrukturen sowie etwaige Schutzmaßnahmen.
2. Langfristige lokale Messwerte würden wertvolle Beiträge für ein geändertes Risiko gegenüber klimatisch gesteuerten Schäden erbringen. Ein möglichst dichtes Messnetzwerk in ganz Österreich – und besonders in Gebieten mit hoher Infrastrukturdichte – wäre demnach wünschenswert.
3. Eine einheitliche Schadensdatenerfassung, sowie eine Homogenisierung der vorhandenen Datensätze ist anzustreben, um Infrastrukturschäden besser quantifizieren zu können;
4. Wichtig für die Schadensquantifizierung in der Zukunft sind Szenarien der Verkehrsentwicklung und des Ausbaus der Verkehrsinfrastruktur (d. h. des Streckennetzes) welche Informationen über Verkehrsdichte und -art (Personen-, Güterverkehr) enthalten. Basierend auf derartigen Szenarien ist es möglich, den Anteil von Reparatur und Instandset-

zung besser abschätzen zu können, da dies auch Folgen für verfügbare Mittel für Neubaumaßnahmen haben könnte.

6.8 Schlussfolgerungen
6.8 Conclusions

Die Folgen des Klimawandels auf die Gesundheit treffen sozial schwächere, ältere und chronisch kranke Bevölkerungsteile in höherem Ausmaß und mit hoher Wahrscheinlichkeit. Eine sehr wahrscheinliche Zunahme an Hitzetagen führt zu starken zusätzlichen Belastungen in den besonders gegenüber Herz-Kreislauf-Erkrankungen sensitiven Bevölkerungsschichten (Ältere und chronisch Kranke) und damit zu einer höheren Mortalität. Die Zahl der durch neu eingewanderte Schadinsekten und andere Wirtstiere übertragenen Erkrankungen wird mit hoher Wahrscheinlichkeit zunehmen und es ist davon auszugehen, dass künftig weitere Impfungen – wie heute schon die Zeckenimpfung – als Routine-Impfungen angeboten werden, um hier entsprechend vorzubeugen. Auch eine Zunahme von Allergien wird als sicher angenommen. Jedenfalls ist durch diese Einflüsse künftig mit höheren Kosten für Heilung und Prävention zu rechnen.

Vor den direkten gesundheitlichen Folgen der Hitze ist eine Linderung durch aktive Kühlung, Lüftung und ausreichende Wasserzufuhr möglich, was ebenfalls teilweise mit höheren Kosten verbunden ist.

Als sehr sicher gilt, dass sozial Schwächere mangels finanzieller Ressourcen und geringerer sozialer Kontakte eine geringere Anpassungskapazität und Unterstützung insbesondere bei zunehmenden Hitzewellen haben. Durch den Klimawandel wird mit hoher Wahrscheinlichkeit ein zusätzlicher Migrationsdruck auf Österreich aus Entwicklungs- und Schwellenländern entstehen. Ob dieser sich auch tatsächlich in höheren Einwanderungszahlen niederschlägt, ist abhängig von der politischen Gestaltung auf EU- und nationaler Ebene.

Die ökonomischen Auswirkungen des Klimawandels in Österreich werden mit Sicherheit Gewinner und Verlierer nach sich ziehen. Genauere Aussagen sind zum jetzigen Zeitpunkt nur für einige Sektoren möglich: während Elektrizitätswirtschaft und Landwirtschaft bis 2050 nur geringe Effekte auf die sektorspezifischen Einkommen zeigen werden, sind für den Tourismus-Sektor aufgrund der abnehmenden Schneesicherheit im Winter und der längeren Sommerperioden sehr wahrscheinlich maßgebliche Verlagerungen innerhalb des Sektors (Nachteile im Winter-, Vorteile im Sommertourismus) sowie zwischen Regionen (Westen versus Osten Österreichs) zu erwarten.

Die Siedlungsräume in Österreich werden primär von sommerlichen Hitzewellen sowie in Einzelfällen auch von Beeinträchtigungen bei der Trinkwasserentstehung betroffen sein. Die Verkehrsinfrastruktur wird in Österreich möglicherweise von Massenbewegungen und Hochwassern stärker betroffen werden.

Sehr wahrscheinlich ist eine zusätzliche Gefährdung der Energie-Infrastruktur im Sommer durch vermehrt auftretende Hitzewellen / Dürren: Erhöhte Nachfrage (nach Kühlwassser), stockende Bereitstellung (Niedrigwasser) und Gefahren für das Verteilernetz (Gewitter) gefährden die Versorgungssicherheit mit Elektrizität und erhöhen die Gefahr von Black-Outs.

Die Schlussfolgerungen aus diesem Kapitel müssen naturgemäß auf Schutz- und Anpassungsmaßnahmen verweisen (vgl. dazu Band 3), um die negativen Folgen des Klimawandels möglichst gering zu halten.

Öffentlich finanzierte Anpassungsmaßnahmen sollten demnach insbesondere den finanzschwachen Bevölkerungsschichten zu Gute kommen und hier vor allem den besonders vulnerablen Älteren sowie Familien mit Kleinkindern. Für finanzstärkere Bevölkerungsschichten ist es hingegen wesentlich, private Anpassung zu ertüchtigen und in nachhaltige Bahnen zu lenken. Hier kann vieles durch die Bereitstellung von Informationen initiiert werden. Gegebenenfalls können Förderungen auch auf Klimawandelanpassung abgestellt werden (z. B. Förderung von Beschattungsmaßnahmen an Gebäuden). Ein besonderes Augenmerk öffentlicher Anpassung muss auf den herausgearbeiteten Gesundheitsfolgen liegen: Hitzewellen, Vektoren (Ausbreitung von Infektionskrankheiten durch verschiedene Trägerorganismen) und Ausbreitung von Allergenen sollten hier im Zentrum von Maßnahmen stehen, die Gesundheitsbeeinträchtigungen durch den Klimawandel verhindern.

Sowohl die ökonomischen Schäden als auch die Auswirkungen auf Siedlungen und technische Infrastrukturen stehen in einem engen Wirkungszusammenhang mit Extremwetterereignissen und extremen Witterungsperioden. Hier sind es weit weniger die graduellen Änderungen von Bedeutung als vielmehr die Schäden durch so genannte „sudden onset“-Ereignisse wie Sturm, Starkniederschlag (Hochwasser und Massenbewegungen), Gewitter, Hagel etc. sowie durch „slow onset“-Ereignisse wie Hitzewellen und Dürren, die die eigentlichen Herausforderungen darstellen. Eine Trennung zwischen Klimawandelanpassung einerseits und Gefahrenzonenplanung, Risikovorsorge und Katastrophenmanagement andererseits wäre unangebracht, vielmehr müssen die gesetzten Maßnahmen miteinander einhergehen. Die Gefahrenzonenplanung ist zum Beispiel den sich durch den Klimawandel

ändernden Gefährdungsprofilen anzupassen. Gleichzeitig ist sie ein Werkzeug der Klimawandelanpassung. Gleiches gilt für die Raumordnung insgesamt, die ein wesentlicher Schlüssel für eine erfolgreiche Anpassung an Klimarisiken ist. Hier besteht eine klare Verpflichtung der öffentlichen Hand und somit die Notwendigkeit öffentlich finanzierter Anpassung.

Im Tourismussektor wiederum geht es u. a. um die Anpassung an das mittel- bis langfristig wohl Unvermeidbare: den Mangel an Naturschnee und – temperaturbedingt – die absehbar nur mehr in bestimmten Gebieten sinnvoll und effizient einsetzbare Beschneiung. Private Anpassung im Sektor muss hier mit öffentlichen Investitionen einhergehen. Es sollten sich sowohl ganze Gemeinden und Regionen in nicht mehr schneesicheren Gebieten mit Alternativen zum klassischen Skitourismus befassen als auch der einzelne Hotelier, Gaststättenbesitzer oder Liftbetreiber. Wie stark letztendlich die in diesem Kapitel beschriebenen Klimafolgen ökonomisch durchschlagen, hängt zu einem großen Teil von der vorausschauenden Anpassung ab, die auf den entsprechenden politischen und gesellschaftlichen Ebenen Anpassungskapazität und Umsetzung aufbauen bzw. vorantreiben muss.

6.9 Literaturverzeichnis
6.9 References

Abegg, B., Agrawala, S., Crick, F., de Montfalcon, A., 2007. Climate change impacts and adaptation in winter tourism., in: Agrawala, S. (Ed.), Climate Change in the European Alps: Adapting Winter Tourism and Natural Hazards Management. Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, pp. 25–60.

Abegg, B., Steiger, A., 2011. Will Alpine summer tourism benefit from climate change? A review, in: Borsdorf, A., Stötter, J., Veuillet, E. (Eds.), Managing Alpine Future II – Inspire and Drive Sustainable Mountain Regions. Proceedings of the Innsbruck Conference, November 21–23, 2011, IGF-Forschungsberichte. Österreichische Akademie der Wissenschaften, Innsbruck, pp. 268–277.

Adnot, J., Riviere, P., Marchio, D., Becirspahic, S., Lopes, C., Blanco, I., Perez-Lombard, L., Ortiz, J., Papakonstantinou, N., Doukas, P., 2003. Energy Efficiency and Certification of Central Air Conditioners (EECCAC) (Study for the D.G. Transportation-Energy (DGTREN) of the Commission of the EU (Final Report) No. Volume 1). ARMINES, Paris.

Allex, B., Liebl, U., Brandenburg, C., Gerersdorfer, T., Czachs, C., 2011. „Hot town, summer in the city" – Die Auswirkungen von Hitzetagen auf das Freizeit- und Erholungsverhalten sowie das Besichtigungsprogramm von StädtetouristInnen – dargestellt am Beispiel Wiens (Endbericht von Start-Clim2010.F in Start-Clim2010: Anpassung an den Klimawandel: Weitere Beiträge zur Erstellung einer Anpassungsstrategie für Österreich). Auftraggeber: BMLFUW, BMWF, BMWFJ, ÖBF, Wien.

Amelung, B., Viner, D., 2006. Mediterranean Tourism: Exploring the Future with the Tourism Climatic Index. Journal of Sustainable Tourism 14, 349–366. doi:10.2167/jost549.0

Amt der Salzburger Landesregierung, 2011. Klimawandel und Raumplanung in Salzburg; Ergebnisse des Alpenraum projekts CLISP zur Anpassung an den Klimawandel für die Modellregion Pinzgau–Pongau. Materialien zur Raumplanung Nr. 22. Land Salzburg, vertreten durch das Amt der Salzburger Landesregierung, Abteilung 7 – Raumplanung, Salzburg.

ARE - Schweizer Bundesamt für Raumentwicklung, 2005. Empfehlung Raumplanung und Naturgefahren. ARE, Bern.

Aspöck, H., 2007. Klimawandel und die Ausbreitung von Krankheiten: Durch Arthropoden übertragene Infektionen in Mitteleuropa. Entomologica Romanica 343–362.

Aspöck, H., 2010. Fluctuations of Biodiversity in Europe in Light of Climate Change, in: Friedrich, B., Hacker, J., Hasnain, S.E., Mettenleiter, T.C., Schell, J. (Eds.), Climate Change and Infectious Diseases, Nova Acta Leopoldina N.F. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Stuttgart, pp. 35–44.

Aspöck, H., Gerersdorfer, T., Formayer, H., Walochnik, J., 2008. Sandflies and sandfly-borne infections of humans in Central Europe in the light of climate change. Wiener klinische Wochenschrift 120, 24–29. doi:10.1007/s00508-008-1072-8

Aspöck, H., Walochnik, J., 2009. When sandflies move north. Public Health 20, 30–37.

Aspöck, H., Walochnik, J., 2010. Krankheitserreger als Neobiota, in: Rabitsch, W., Essl, F. (Eds.), Aliens: Neobiota und Klimawandel - eine verhängnisvolle Affäre? Verlag der Provinz, Weitra, pp. 126–148.

Auer, H., Susani, M., 2008. Der erste autochthone Fall einer subkutanen Dirofilariose in Österreich. Wiener klinische Wochenschrift 120, 104–106. doi:10.1007/s00508-008-1031-4

BABS, 2003. Katarisk: Katastrophen und Notlagen in der Schweiz. Eine Risikobeurteilung aus Sicht des Bevölkerungsschutzes. BABS Bundesamt für Bevölkerungsschutz, Bern.

Bacchini, M., Zannoni, A., 2003. Relations between rainfall and triggering of debris-flow: case study of Cancia (Dolomites, Northeastern Italy). Natural Hazards and Earth System Science 3, 71–79. doi:10.5194/nhess-3-71-2003

Bader, S., Kunz, P., 1998. Klimarisiken-Herausforderung für die Schweiz: wissenschaftlicher Schlussbericht im Rahmen des nationalen Forschungsprogrammes „Klimaänderungen und Naturkatastrophen" NFP 31. Vdf, Hochsch.-Verl. an der ETH, Zürich.

Beck, U., 2010. Remapping social inequalities in an age of climate change: for a cosmopolitan renewal of sociology. Global Networks 10, 165–181. doi:10.1111/j.1471-0374.2010.00281.x

Becken, S., Hay, J.E., 2007. Tourism and Climate Change: Risks and Opportunities. Multilingual Matters.

Behm, M., Raffeiner, G., Schöner, W., 2006. Auswirkungen der Klima und Gletscheränderung auf den Alpinismus. Umweltdachverband, Wien.

Biffl, G., 2011. Die ökonomische Situation der Frauen in Österreich, in: Frauenbericht 2010 Teil II: Berichte Zu Ausgewählten Themen von Frauen in Österreich. Bundeskanzleramt Österreich – Bundesminsterium für Frauen und Öffentlichen Dienst, Wien, Österreich, p. 38.

BKA – Bundeskanzleramt, 2013. Hochwasser: Union packt beim Wiederaufbau mit an [WWW Document]. Europa – entdecken-wissen-nutzen. URL http://www.zukunfteuropa.at/site/cob__51668/6752/default.aspx (accessed 6.9.14).

Blaschitz, M., Narodoslavsky-Gfoller, M., Kanzler, M., Stanek, G., Walochnik, J., 2008b. Babesia Species Occurring in Austrian Ixodes ricinus Ticks. Applied and Environmental Microbiology 74, 4841–4846. doi:10.1128/AEM.00035-08

Blaschitz, M., Narodoslavsky-Gföller, M., Kanzler, M., Walochnik, J., Stanek, G., 2008c. First Detection of Rickettsia helvetica in Ixodes ricinus Ticks in Austria. Vector-Borne and Zoonotic Diseases 8, 561–564. doi:10.1089/vbz.2007.0250

Blaschitz, M., Narodoslavsky-Gföller, M., Kanzler, M., Walochnik, J., Stanek, G., 2008a. Borrelia burgdorferi sensu lato genospecies in questing Ixodes ricinus ticks in Austria. International Journal of Medical Microbiology 298, 168–176. doi:10.1016/j.ijmm.2007.10.001

Blaschke, A.P., Merz, R., Parajka, J., Salinas, J., Blöschl, G., 2011. Auswirkungen des Klimawandels auf das Wasserdargebot von Grund- und Oberflächenwasser. Österr Wasser- und Abfallw 63, 31–41. doi:10.1007/s00506-010-0273-3

Blöschl, G., Montanari, A., 2010. Climate change impacts—throwing the dice? Hydrological Processes 24, 374–381. doi:10.1002/hyp.7574

Blöschl, G., Schöner, W., Kroiß, H., Blaschke, A.P., Böhm, R., Haslinger, K., Kreuzinger, N., Merz, R., Parajka, J., Salinas, J.L., Viglione, A., 2011. Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft – Ziele und Schlussfolgerungen der Studie für Bund und Länder. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, ÖWAW 1–2/2011 63, 1–10. doi:10.1007/s00506-010-0274-2

Blöschl, G., Viglione, A., Heindl, H., 2009. Dynamik von Hochwasserbemessungsgrößen und Konsequenzen – Klimawandel. Floodrisk II, Vertiefung und Vernetzung zukunftsweisender Umsetzungsstrategien zum integrierten Hochwassermanagement. TP 6.2 Dynamik der Bemnessungsgrößen und Konsequenzen - Klimawandel, in: Habersack, H., Bürgel, J., Kanonier, A. (Eds.), Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.

BMASK, 2011. Armuts- und Ausgrenzungsgefährdung in Österreich. Ergebnisse aus EU-SILC 2011. Bundesministerium für Arbeit, Soziales und Konsumentenschutz, Wien.

BMLFUW – Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, 2010. Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft – Kurzfassung (Studie der ZAMG und der TU Wien im Auftrag von Bund und Ländern). Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, Österreich.

BMLFUW – Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2011. Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft. Langfassung (Studie der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik und der Technischen Universität Wien im Auftrag von Bund und Ländern). Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Sektion Wasser, Wien, Austria.

BMLFUW – Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2012. Die österreichische Strategie zur Anpassung an den Klimawandel. Teil 1 – Kontext. Vorlage zur Annahme im Ministerrat. BMLFUW (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.

Bogdan, C., Schönian, G., Banuls, A.-L., Hide, M., Pratlong, F., Lorenz, E., Rollinghoff, M., Mertens, R., 2001. Visceral Leishmaniasis in a German Child Who Had Never Entered a Known Endemic Area: Case Report and Review of the Literature. Clinical Infectious Diseases 32, 302–306. doi:10.1086/318476

Böhm, R., 2008. Harte und weiche Faktoren zum Klimawandel – ein Überblick, in: Böhm, R., Godina, R., Nachtnebel, H.-P., Pirker, O. (Eds.), Auswirkungen Des Klimawandels Auf Die Österreichische Wasserwirtschaft. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV), Wien, pp. 53–71.

Böhm, R., Godina, R., Nachtnebel, H.-P., Pirker, O., 2008. Mögliche Klimafolgen für die Wasserwirtschaft in Österreich, in: Böhm, R., Godina, R., Nachtnebel, H.-P., Pirker, O. (Eds.), Auswirkungen Des Klimawandels Auf Die Österreichische Wasserwirtschaft. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV), Wien, pp. 7–27.

Bonelli, P., Lacavalla, M., 2010. How Synoptic Data Can Be Used To Investigate The Effect Of Climate Change On Black-Out Risk? A Study On Trends In Snow Deposition On Power Lines, in: Troccoli, A. (Ed.), Management of Weather and Climate Risk in the Energy Industry, NATO Science for Peace and Security. Springer Netherlands, pp. 305–314.

Bowler, D.E., Buyung-Ali, L., Knight, T.M., Pullin, A.S., 2010. Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. Landscape and Urban Planning 97, 147–155. doi:10.1016/j.landurbplan.2010.05.006

Boyd, R., Hunt, A., 2006. Costing the local and regional impacts of climate change using the UKCIP Costing Methodology. Metroeconomica Limited.

Breiling, M., Charamza, P., Skage, O.R., 1997. Klimasensibilität österreichischer Bezirke mit besonderer Berücksichtigung des Wintertourismus (Langfassung Endbericht No. Projektnummer 18 3895 / 222 - I / 9 / 95). Institut für Landschaftsplanung Alnarp, Schwedische Universität für Agrarwissenschaften. Forschungsauftrag des Österreichischen Bundesministerium für Wirtschaftliche Angelegenheiten / Abteilung Tourismuspolitik und des Österreichischen Bundesministerium für Umwelt, Alnarp.

Brugger, K., Rubel, F., 2009. Simulation of climate-change scenarios to explain Usutu-virus dynamics in Austria. Preventive Veterinary Medicine 88, 24–31. doi:10.1016/j.prevetmed.2008.06.023

Brunner, K.-M., Spitzer, M., Christanell, A., 2012. Experiencing fuel poverty. Coping strategies of low-income households in Vienna / Austria. Energy Policy 49, 53–59. doi:10.1016/j.enpol.2011.11.076

Caras, I., Shapiro, B., 1975. Partial purification and properties of microsomal phosphatidate phosphohydrolase from rat liver. Biochim. Biophys. Acta 409, 201–211.

CEER – Council of European Energy Regulators, 2008. 4th benchmarking report on the quality of electricity supply (No. C08-EQS-24-04). Council of European Energy Regulators ASBL, Brussels.

Cerva, L., Novăk, K., 1968. Amoebic meningoencephalitis: 16 fatalities. Science 160, 92.

Ciscar, J.-C., Iglesias, A., Feyen, L., Szabó, L., Regemorter, D.V., Amelung, B., Nicholls, R., Watkiss, P., Christensen, O.B., Dankers, R., Garrote, L., Goodess, C.M., Hunt, A., Moreno, A., Richards, J., Soria, A., 2010b. Supporting Information; 10.1073 / pnas.1011612108.

Ciscar, J.-C., Iglesias, A., Feyen, L., Szabó, L., Regemorter, D.V., Amelung, B., Nicholls, R., Watkiss, P., Christensen, O.B., Dankers, R., Garrote, L., Goodess, C.M., Hunt, A., Moreno, A.,

Richards, J., Soria, A., 2010a. Physical and economic consequences of climate change in Europe. Proceedings of the National Academy of Sciences 201011612. doi:10.1073/pnas.1011612108

Clausen, L., 2010. Wohin mit den Klimakatastrophen?, in: Welzer, H., Soeffner, H.-G., Giesecke, D. (Eds.), KlimaKulturen: Soziale Wirklichkeiten Im Klimawandel. Campus, Frankfurt am Main; New York.

ClimateCost, 2010. The costs and benefits of adaptation in Europe: review summary and synthesis (CliamateCost Policy Brief No. N° 2). European Commission RTD, 7th Framework Programme Project.

Cogo, P.E., Scaglia, M., Gatti, S., Rossetti, F., Alaggio, R., Laverda, A.M., Zhou, L., Xiao, L., Visvesvara, G.S., 2004. Fatal Naegleria fowleri Meningoencephalitis, Italy. Emerging Infectious Diseases 10, 1835–1837. doi:10.3201/eid1010.040273

Confalonieri, U., Menne, B., Akhtar, R., Ebi, K.L., Hauengue, M., Kovats, R.S., Revich, B., Woodward, A., 2007. Human health, in: Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., Van der Linden, P.J., Hanson, C.E. (Eds.), Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 391–431.

CRED – Centre for Research on the Epidemiology of Disaster, 2009. EM-DAT. The OFDA / CRED International Disaster Database. Université Catholique de Louvain. Brussels. Belgium [WWW Document]. URL http://www.emdat.be/ (accessed 6.11.14).

Dahlgren, G., Whitehead, M., 1991. Policies and strategies to promote social equity in health. Institute for Future Studies, Stockholm: Donaldson G., Kovats R. S., Keatinge W. R. et al. (2001) Heat-and-cold-related mortality and morbidity and climate change, in: Health Effects of Climate Change in the UK. London. Department of Health, London, UK, pp. 70–80.

Demetriades, J., Esplen, E., 2010. The Gender Dimensions of Poverty and Climate Change Adaptation, in: Mearns, R., Norton, A. (Eds.), Social Dimensions of Climate Change: Equity and Vulnerability in a Warming World. World Bank Publications, Washington.

Depaquit, J., Grandadam, M., Fouque, F., Andry, P.E., Peyrefitte, C., 2010. Arthropod-borne viruses transmitted by Phlebotomine sandflies in Europe: a review. Euro Surveillance 15, 1–8.

Dobler, C., Bürger, G., Stötter, J., 2012. Assessment of climate change impacts on flood hazard potential in the Alpine Lech watershed. Journal of Hydrology 460–461, 29–39. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.06.027

Dobler, G., Aspöck, H., 2010a. Durch Zecken übertragene Arboviren als Erreger von Infektionen des Menschen, in: Aspöck, H. (Ed.), Krank Durch Arthropoden, Denisia 30. Land Oberösterreich, Biologiezentrum / Oberösterreichische Landesmuseum, Linz, pp. 467–499.

Dobler, G., Aspöck, H., 2010b. Durch Sandmücken und durch Gnitzen übertragene Arboviren als Erreger von Infektionen des Menschen, in: Aspöck, H. (Ed.), Krank Durch Arthropoden, Denisia 30. Land Oberösterreich, Biologiezentrum / Oberösterreichische Landesmuseum, Linz, pp. 555–564.

Drlik, S., 2010. Klimawandelanpassung der Pflege und Erhaltung öffentlicher Grünanlagen in Großstädten unter Berücksichtigung des Konzepts der Nachhaltigen Entwicklung, untersucht am Fallbeispiel Wien. Dissertation. Universität für Bodenkultur, Wien.

Drlik S., Licka L., Städte im Klimawandel – Strategien für eine nachhaltige Parkentwicklung In: Braum M., Schröder T., Bericht der Bundesstiftung Baukultur 2010. Freiraum. Wie findet Freiraum Stadt? Fakten, Positionen, Beispiele; Birkhäuser, Basel; ISBN 978-3-0346-0363-8.

Drlik, S., Muhar, A., Lička, L., Chen, F.J., 2011. Klimawandel findet Stadt(gärten). Die Verantwortung von Stadtgartenverwaltungen in Anpassungsprozessen. Stadt und Grün, 60(1), 54–58; ISSN 0016-4739.

Ebinger, J.O., Vergara, W., 2011. Climate Impacts on Energy Systems: Key Issues for Energy Sector Adaptation (World Bank Study). World Bank Publications, Washington, DC.

ECDC European Centre for Disease Prevention and Control, 2013. Annual epidemiological Report 2012. Reporting on 2010 surveillance data and 2011 epidemic intelligence data. Stockholm.

Eckhardt, F., 2010. Klimawandel und soziale Gerechtigkeit (Studie zur Vorbereitung einer Tagung in der Chinese Academy of Social Sciences). Universität Rostock (im Auftrag der Konrad Adenauer Stiftung), Rostock, Deutschland.

E-Control, 2011. Ausfalls- und Störungsstatistik für Österreich, Ergebnisse 2010. E-Control Austria, Wien.

Ecoplan – Forschung und Beratung in Wirtschaft und Politik, 2007. Auswirkungen der Klimaänderung auf die Schweizer Volkswirtschaft (nationale Einflüsse) (Schlussbericht). Arbeitsgemeinschaft Ecoplan / Sigmaplan, im Auftrag des Bundesamt für Umwelt (BAFU) und Bundesamt für Energie (BFE), Bern, Schweiz.

EEA – European Environment Agency, 2012. Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012 – An indicator-based report., EEA Report No 12/2012. EEA, Copenhagen, Denmark.

Egli, T., 2005. Wegleitung Objektschutz gegen gravitative Naturgefahren. Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen, Bern.

Ehmer, P., Heymann, E., 2008. Klimawandel und Tourismus: Wohin geht die Reise?, Aktuelle Themen 416. Deutsche Bank Research, Frankfurt am Main.

Eis, D., Helm, D., Laußmann, D., Stark, K., 2010. Klimawandel und Gesundheit – Ein Sachstandsbericht. Robert Koch-Institut, Berlin.

EK – Europäische Kommission, 2009. Weißbuch. Anpassung an den Klimawandel: Ein europäischer Aktionsrahmen (No. KOM(2009) 147 endgültig). Europäische Kommission, Brüssel.

EK – Europäische Kommission, 2010. Comission Staff Working Paper – Risk Assessment and mapping Guidelines for Disaster Management (No. SEC(2010) 1626 final). European Commission, Brussels.

Enei, R., Doll, C., Klug, S., Partzsch, I., Sedlacek, N., Nesterova, N., Kiel, J., Rudzikaite, L., Papanikolaou, A., Mitsakis, V., 2011. „Vulnerability of transport systems – Main report" Transport Sector Vulnerabilities within the research project WEATHER (Weather Extremes: Impacts on Transport Systems and Hazards for European Regions) funded under the 7th framework program of the European Commission. Project co-ordinator: Fraunhofer - ISI, Karlsruhe, 30.9.2010.

EPSON Climate, 2011b. Climate Change and territorial effects on regions and local economies (Applied Research 2013/1/4. Draft Final Report Version 25/2/2011. Executive Summary.). ESPON & IRPUD, TU Dortmund.

EPSON Climate, 2011a. Climate Change and territorial effects on regions and local economies (Applied Research 2013/1/4. Final Report. Version 31 / 5 / 2011). ESPON & IRPUD, TU Dortmund.

Ereignisdokumentation Hochwasser August 2002, Plattform Hochwasser, 2003. . Universität für Bodenkultur Wien; BM für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.

Erell, E., Pearlmutter, D., Williamson, T.J., 2011. Urban Microclimate: Designing the Spaces Between Buildings. Routledge.

Erf, R. van der, Beer, J. de, Gaag, N. van der, 2009. DEMIFER Demographic flows affecting Eurioean regions and Cities. Deliverable 1: Report on effects of demographic and migration flows on European regions (Applied Research Project No. 2013/1/3), The ESPON 2013 Programme. Netherlands Interdisciplinary Demographic Institute (NIDI), The Hague, Netherlands.

ESSL, 2013. ESDW – European Severe Weather Database [WWW Document]. URL http://www.essl.org/cgi-bin/eswd/eswd.cgi (accessed 6.9.14).

Falk, M., 2010. A dynamic panel data analysis of snow depth and winter tourism. Tourism Management 31, 912–924. doi:10.1016/j.tourman.2009.11.010

Fezer, F., Eichler, H., Seitz, R., 1977. Klimatologische Untersuchungen im Rhein-Neckar-Raum. Studien für die Regional- und Siedlungsplanung., Heidelberger geographische Arbeiten. Selbstverlag des Geographischen Instituts der Universität Heidelberg, Heidelberg, Deutschland.

Fischer, D., Thomas, S.M., Beierkuhnlein, C., 2010. Temperature-derived potential for the establishment of phlebotomine sandflies and visceral leishmaniasis in Germany. Geospatial Health 5, 59–69.

Fleischhacker, E., Formayer, H., Seisser, O., Wolf-Eberl, S., Kromp-Kolb, H., 2009. Auswirkungen des Klimawandels auf das künftige Reiseverhalten im österreichischen Tourismus. Am Beispiel einer repräsentativen Befragung der österreichischen Urlaubsreisenden. Forschungsbericht im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft, Familie und Jugend.

Fleischhacker, V., Formayer, H., 2007. Die Sensitivität des Sommertourismus in Österreich auf den Klimawandel (StartClim2006. D1, Teilprojekt von StartClim2006). Institut für touristische Raumplanung – ITR, Universität für Bodenkultur, Department für Wasser – Atmosphäre – Umwelt, Institut für Meteorologie, Tulln, Wien.

Formayer, H., Hofstätter, M., Haas, P., 2009. BOKU-Met Report 11 Untersuchung der Schneesicherheit und der potenziellen Beschneiungszeiten in Schladming und Ramsau (Endbericht STRATEGE No. 11; BOKU-Met Report). Institut für Meteorologie, Universität für Bodenkultur, Wien.

Formayer, H., Hofstätter, M., Haas, P., 2011. Klimatische Situation und lokale Klimaszenarien für die Wintersaison, in: Tourismus im Klimawandel: zur regionalwirtschaftlichen Bedeutung des Klimawandels für die österreichischen Tourismusgemeinden. Verlag der österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, pp. 152–179.

Formayer, H., Kromb-Kolb, H., 2009b. Hochwasser und Klimawandel. Auswirkungen des Klimawandels auf Hochwasserereignisse in Österreich (Endbericht im Auftrag des World Wide Fund for Nature (WWF) No. BOKU-Met Report 7). Institut für Meteorologie (BOKU-Met) Department Wasser – Atmosphäre – Umwelt Universität für Bodenkultur Wien, Wien.

Formayer, H., Kromp-Kolb, H., 2009a. Klimawandel und Tourismus in Oberösterreich. (Forschungsbericht im Auftrag des OÖ Umweltlandesrat Rudi Anschober und der Landes-Tourismusorganisation Oberösterrei c h No. 18 BOKU_Met Report).

Fuchs, S., 2008. Klimawandel und sozioökonomische Veränderungen – Herausforderungen des Umgangs mit Naturgefahren in Berggebieten, in: Böhm, R., Godina, R., Nachtnebel, H.-P., Pirker, O. (Eds.), Auswirkungen Des Klimawandels Auf Die Österreichische Wasserwirtschaft. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV), Wien, pp. 117–128.

Füssel, H.-M., Klein, R.J.T., 2006. Climate Change Vulnerability Assessments: An Evolution of Conceptual Thinking. Climatic Change 75, 301–329. doi:10.1007/s10584-006-0329-3

Gall, M., Borden, K.A., Cutter, S.L., 2009. When Do Losses Count? Six Fallacies of Natural Hazards Loss Data. Bulletin of the American Meteorological Society 90, 799–809. doi:10.1175/2008BAMS2721.1

GDV, 2011. Herausforderung Klimawandel. Antworten und Forderungen der deutschen Versicherer. GDV Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V., Berlin.

Gerersdorfer, T., Formayer, H., Moshammer, H., Frank, A., Haas, P., Leitner, B., 2006. Untersuchung zur nächtlichen Abkühlung in einem sich ändernden Klima (Endbericht zum Projekt StartClim2005.A1b, Teilprojekt von StartClim2005 „Klimawandel und Gesundheit" No. StartClim2005.A1b). Institut für Meteorologie Universität für Bodenkultur, Medizinische Universität Wien, ZPH Institut für Umwelthygiene, Wien.

Glaser, T., 2011. Armuts- und Ausgrenzungsgefährdung in Österreich: Ergebnisse aus EU-SILC 2010. BMASK, Wien.

Gobiet, A., Truhetz, H., 2008. Klimamodelle, Klimaszenarien und ihre Bedeutung für Österreich, in: Böhm, R., Godina, R., Nachtnebel, H.P., Pirker, O. (Eds.), Auswirkungen Des Klimawandels Auf Die Österreichische Wasserwirtschaft. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV), Wien, pp. 71–82.

Gobiet, A., Truhetz, H., Habsburg-Lothringen, C., Prettenthaler, F., 2008. In welchem Klima werden wir künftig heizen und kühlen?, in: Prettenthaler, F., Gobiet, A., Töglhofer, C. (Eds.), Heizen Und Kühlen Im Klimawandel, Studien Zum Klimawandel in Österreich. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, pp. 13–27.

Gobiet, A., Truhetz, H., Riegler, A., 2007. A climate scenario for the Alpine region. Reclip:more. Research for Climate Protection: Model Run Evaluation. Project Year 3. Wegener Center for Climate and Global Change, University of Graz, Graz, Austria.

Gössling, S., Hall, C.M., 2006. An introduction to tourism and global environmental change, in: Gössling, S., Hall, C.M. (Eds.), Tourism and Global Environmental Change. Ecological, Social, Economic and Political Interrelationships, Contemporary Geographies of Leisure, Tourism, and Mobility. Routledge, London, UK, New York, USA, pp. 1–33.

Haines, A., Kovats, R.S., Campbell-Lendrum, D., Corvalan, C., 2006. Climate change and human health: impacts, vulnerability and public health. Public Health 120, 585–596. doi:10.1016/j.puhe.2006.01.002

Heller, M., Edelstein, P., Mayer, M., 1975. Membrane-bound enzymes. III. Protease activity in leucocytes in relation to erythrocyte membranes. Biochim. Biophys. Acta 413, 472–482.

Höferl, K.-M., 2010. „Von der Gefahrenabwehr zur Risikokultur" – Diskurse zum raumplanerischen Umgang mit Hochwasser in (Nieder-)Österreich (Dissertation). Universität für Bodenkultur, Wien.

Höferl, K.-M., Jelinek, B., 2007. Vom Konstrukt zur Empirie: Beobachtungen zur „Strukturstärke bzw. Strukturschwäche" österreichischer Gemeinden, in: Schrenk, M., Popovich, V.V., Benedikt, J. (Eds.), REAL CORP 007 „Planen Ist Nicht Genug", 12. Internationale Konferenz Zu Stadtplanung Und Regionalentwicklungn in Der Informationsgesellschaft. 20.–23. Mai 2007, Wien.

Tagungsband. CORP, Competence Center of Urban and Regional Planning, Schwechat-Rannersdorf, pp. 781–790.

Hofherr, T., Miesen, P. (2012): Erstellung einer Schadenverteilungskurve für versicherte Marktschäden in Österreich. In: Prettenthaler; F. & Albrechter, H.: Sturmschäden: Modellierung der versicherten Schäden in Österreich. Studien zum Klimawandel in Österreich, Band 8; Wien: Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften. S. 111–120.

Holub, M., Gruber, H., Fuchs, S., 2011. Naturgefahren-Risiko aus Sicht des Versicherers, in: Studienreise 2010 – Risiko Im Bereich Schutz Vor Naturgefahren, Div. Beiträge, Wildbach- Und Lawinenverbau. Verein der Diplomingenieure der WLV Österreicher, pp. 74–86.

Holzmann, H., Aberle, S.W., Stiasny, K., Werner, P., Mischak, A., Zainer, B., Netzer, M., Koppi, S., Bechter, E., Heinz, F.X., 2009. Tick-borne Encephalitis from Eating Goat Cheese in a Mountain Region of Austria. Emerging Infectious Diseases 15, 1671–1673. doi:10.3201/eid1510.090743

Hübler, M., Klepper, G., 2007. Kosten des Klimawandels Die Wirkung steigender Temperaturen auf Gesundheit und Leistungsfähigkeit. (Im Auftrag des WWF Deutschland) (Studie No. Aktualisierte Fassung 07 / 2007). Institut für Weltwirtschaft, Kiel.

Huttenlau, M., Moran, A., Stötter, J., Spitzer, R., Steixner, T., 2010. Comparative risk analysis of extreme natural hazard events in the Austrian Province of Tyrol, in: Malet, J.-P., Glade, T., Casagli, N. (Eds.), Mountain Risks: Bringing Science to Society. Proceedings of the International Conference, 24–26th November, 2010, Florence, Italy. European Centre on Geomorphological Hazards, Strassburg, pp. 363–372.

Huttenlau, M., Stötter, J., 2012. Risk-based damage potential and loss estimation of earthquake scenarios in the moderate endangered Austrian Federal Province of Tyrol. Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards 6, 105–127. doi:10.1080/17499518.2011.645735

Hutter, H.-P., Moshammer, H., Wallner, P., Leitner, B., Kundi, M., 2007. Heatwaves in Vienna: effects on mortality. Wiener klinische Wochenschrift 119, 223–227. doi:10.1007/s00508-006-0742-7

IPCC, 2007. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

IPCC, 2012. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaption. A special Report of Working groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.

IPCC, 2013. Summary for Policymakers, in: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (Eds.), Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Jendritzky, G., 2007. Folgen des Klimawandels für die Gesundheit, in: Endlicher, W., Gerstengarbe, F.-W. (Eds.), Der Klimawandel – Einblicke, Rückblicke Und Ausblicke. Potsdam Institut für Klimafolgenforschung e.V., Potsdam, Deutschland, pp. 108–118.

Jonas, H., 1979. Das Prinzip Verantwortung: Versuch einer Ethik für die technologische Zivilisation, Frankfurt am Main.1979. Neuauflage als Surkamp Taschenbuch, 1984.

Jonas, M., Staeger, T., Schönwiese, C.-D., 2005. Berechnung der Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten von Extremereignissen durch Klimaänderungen – Schwerpunkt Deutschland (Forschungsbericht 201 41 254), Climate Change 07 / 2005. Umweltbundesamt, Dessau.

Kaiser, P., Binder, C., 2005. Katastrophenmanagement und Gesundheitsversorgung vor neuen Herausforderungen – Eine Perspektive des Österreichischen Roten Kreuzes, in: Steininger, K.W., Steinreiber, C., Ritz, C. (Eds.), Extreme Wetterereignisse Und Ihre Wirtschaftlichen Folgen. Springer Berlin Heidelberg, pp. 137–150.

Kleidorfer, M., Mikovits, C., Jasper-Tönnies, A., Huttenlau, M., Einfalt, T., Rauch, W., 2014. Impact of a Changing Environment on Drainage System Performance. Procedia Engineering, 12th International Conference on Computing and Control for the Water Industry, CCWI2013 70, 943–950. doi:10.1016/j.proeng.2014.02.105

Kollaritsch, H., Emminger, W., Zaunschirm, A., Aspock, H., 1989. Suspected autochthonous kala-azar in Austria. The Lancet 333, 901–902. doi:10.1016/S0140-6736(89)92895-X

Kornschober, C., Mikula, C., Springer, B., 2009. Salmonellosis in Austria: situation and trends. Wiener klinische Wochenschrift 121, 96–102. doi:10.1007/s00508-008-1128-9

Kortschak, D., Lautscham, H., Prettenthaler, F., Habsburg-Lothringen, C., 2009. Hochwasser-Risikoabschätzung für Österreich unter Verwendung einer Nachbarschaftsrelations-Methode, in: Prettenthaler, F., Albrecher, H. (Eds.), Hochwasserrisiko Und Dessen Versicherung in Österreich: Evaluierung Und Ökonomische Analyse Des von Der Versicherungswirtschaft Vorgeschlagenen Modells NatKat, Studien Zum Klimawandel in Österreich. Verlag der österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, pp. 91–103.

Kovats, R.S., Edwards, S.J., Charron, D., Cowden, J., D'Souza, R.M., Ebi, K.L., Gauci, C., Gerner-Smidt, P., Hajat, S., Hales, S., Pezzi, G.H., Kriz, B., Kutsar, K., McKeown, P., Mellou, K., Menne, B., O'Brien, S., Pelt, W. van, Schmid, H., 2005. Climate variability and campylobacter infection: an international study. International Journal of Biometeorology 49, 207–214. doi:10.1007/s00484-004-0241-3

Kovats, R.S., Edwards, S.J., Hajat, S., Armstrong, B.G., Ebi, K.L., Menne, B., 2004. The effect of temperature on food poisoning: a time-series analysis of salmonellosis in ten European countries. Epidemiology and infection 132, 443–453.

Krajasits, C., Andel, A., Neugebauer, W., Stanzer, G., Wach, I., Kroisleitner, C., Schöner, W., 2008. ALSO WIKI. Alpiner Sommertourismus und mögliche Wirkungen des Klimawandels (Endbericht StartClim2007.F Teilprojekt von StartClim2007). Österreichisches Institut für Raumplanung, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien.

Kranzl, L., Müller, A., Formayer, H., 2011. Kühlen und Heizen 2050: Klimawandel und andere Einflussfaktoren, in: Energieversorgung 2011: Märkte Um Des Marktes Willen? Presented at the IEWT 2011 – 7. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien, 16.–18. Februar 2011.

Kuhn, K.G., Campbell-Lendrum, D.H., Armstrong, B., Davies, C.R., 2003. Malaria in Britain: past, present, and future. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 100, 9997–10001. doi:10.1073/pnas.1233687100

Krüger, B.C., Schicker, I., Formayer, H., Moshammer, H., 2009. Feinstaub und Klimawandel – Gibt es Zusammenhänge in Nordostösterreich? (Endbericht zum Projekt StartClim2006.A No.

BOKU-Met Report 9). Institut für Meteorologie (BOKU-Met) Department Wasser – Atmosphäre – Umwelt Universität für Bodenkultur Wien. Auftraggeber: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft; Bundesministerium für Gesundheit, Familie und Jugend; Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung; Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit; Österreichische Hagelversicherung, Wien.

Kupfner, R., 2011. Genderspezifisches Energieverhalten in armen und armutsgefährdeten Haushalten- unter besonderer Berücksichtigung von Energiearmut (Diplomarbeit). Universität Wien, Wien.

Kuttler, W., 2011. Klimaänderungen im urbanen Bereich, Teil 1: Wirkungen; Climate change in urban areas, part 1:effects. Environmental Sciences Europe 23, 11. doi:10.1186/2190-4715-23-11

Kyselý, J., 2004. Mortality and displaced mortality during heat waves in the Czech Republic. International journal of biometeorology 49, 91–97. doi:10.1007/s00484-004-0218-2

Landauer, V.M., Pröbstl, U., 2008. Klimawandel, Skilanglauf und Tourismus in Österreich. Wahrnehmung durch Skilangläufer, Landschaftserlebnis und mögliche Adaptionsstrategien. Naturschutz und Landschaftsplanung. Naturschutz und Landschaftsplanung 40, 336–342.

Laschewski, G., Jendritzky, G., 2002. Effects of the thermal environment on human health: an investigation of 30 years of daily mortality data from SW Germany. Climate Research 21, 91–103. doi:10.3354/cr021091

Leckebusch, G.C., Ulbrich, U., 2004. On the relationship between cyclones and extreme windstorm events over Europe under climate change. Global and Planetary Change 44, 181–193. doi:10.1016/j.gloplacha.2004.06.011

Leschnik, M., Löwenstein, M., Edelhofer, R., Kirtz, G., 2008. Imported non-endemic, arthropod-borne and parasitic infectious diseases in Austrian dogs. Wiener klinische Wochenschrift 120, 59–62. doi:10.1007/s00508-008-1077-3

Lieb, G.K., Kern, K., Seier, G., Kellerer-Pirklbauer-Eulenstein, A., Strasser, U., 2010. AlpinRiskGP – Abschätzung des derzeitigen und zukünftigen Gefährdungspotentials für Alpintouristen und Infrastruktur bedingt durch Gletscherrückgang und Permafrostveränderung im Großglockner-Pasterzengebiet (Hohe Tauern, Österreich). Endbericht StartClim2009.F in StartClim2009: Anpassung an den Klimawandel: Beiträge zur Erstellung einer Anpassungsstrategie für Österreich, Auftraggeber: BMLFUW, BMWF, BMWFJ, ÖBF.

Lloyd, J., 2013. Cold Enough. Excess Winter Deaths, Winter Fuel Payments and the UK's problem with the cold. Strategic Society Centre SSC, London.

Loibl, D.W., Züger, J., Köstl, M., 2009. Reclip:more. STANDORT-Z Angew Geogr 33, 94–100. doi:10.1007/s00548-009-0121-5

Loibl, W., Jäger, A., Knoflacher, M., Köstl, M., Züger, J., 2010. Urban Streetscapes responding to changing climate conditions – Effects of street layout on thermal exposure, in: Mahdavi, A., Martens, B. (Eds.), BauSIM 2010. Building Performance Simulation in a Changing Environment. Proceedings of the Third German-Austrian IBPSA Conference Vienna University of Technology September 22–24, 2010. International Building Performance Simulation Association (IBPSA), TU Wien, Institut für Architekturwissenschaften, Abteilung Bauphysik und Bauökologie; Selbstverlag, Wien, Österreich.

Loibl, W., Züger, J., Köstl, M., 2011a. reclip:century 1 – Research for Climate Protection: Century Climate Simulations. Climate Scenarios: Comparative Analysis (Final Report Part C No. ACRP Project Number: A760437). AIT Austrian Institute of Technology, Vienna.

Loibl, W., Tötzer, T., Köstl, M., Züger, H., Knoflacher, M., 2011b. Modelling Micro-climate Characteristics for Urban Planning and Building Design, in: Hřebíček, J., Schimak, G., Denzer, R. (Eds.), Environmental Software Systems. Frameworks of eEnvironment, IFIP Advances in Information and Communication Technology. Springer Berlin Heidelberg, pp. 605–617.

Loibl, W., Stiles, R., Pauleit, S., Hagen, K., Gasienica, B., Tötzer, T., Trimmel, H., Köstl, M., Feilmayr, W., 2014. Improving Open Space Design to Cope Better with Urban Heat Island Effects. GAIA – Ecological Perspectives for Science and Society 23, 64–66. doi:10.14512/gaia.23.1.17

Luthe, T., 2009. SkiSustain – Vulnerability to global change and sustainable adaption of ski tourism (Dissertation). Deutsche Sporthochschule Köln Institut für Natursport und Ökologie, Köln.

Martikainen, A., Pykälä, M.-L., Farin, J., 2007. Recognizing climate change in electricity network design and construction, VTT Research Notes 2419. VTT Technical Research Centre of Finland, Biologinkuja, Finland.

Matzarakis, A., Endler, C., Neumcke, R., Koch, E., Rudel, E., 2007. Auswirkungen des Klimawandels auf das klimatische Tourismuspotenzial (Endbericht StartClim2006.D2 Teilprojekt von StartClim2006). StartClim2006 wurde aus Mitteln des BMLFUW, des BMGFJ, des BMWF, des BMWA und der Österreichischen Hagelversicherung gefördert.

McMichael, A.J., 2011. Insights from past millennia into climatic impacts on human health and survival. Proceedings of the National Academy of Sciences. doi:10.1073/pnas.1120177109

McMichael, A.J., Campbell-Lendrum, D., Kovats, S., Edwards, S., Wilkinson, P., Wilson, T., Nicholls, R., Hales, S., Tanser, F., Le Sueur, D., Schlesinger, M., Andronova, N., 2004. Global Climate Change, in: Ezzati, M., Lopez, A.D., Rodgers, A., Murray, C.J.L. (Eds.), Comparative Quantification of Health Risks, Global and Regional Burden of Disease Attributable to Selected Major Risk Factors. World Health Organization, Geneva, pp. 1543–1650.

Menne, B., Ebi, K.L., 2006. Climate Change and Adaptation Strategies for Human Health. Steinkopff, Darmstadt, Deutschland.

Metroeconomica, 2004. Costing the impacts of climate change in the UK Overview of guidelines (KCIP Technical Report). UKCIP, Oxford.

Mima, S., Criqui, P., Watkiss, P., 2011. The Impacts and Economic Costs of Climate Change on Enery in Europe. Summary of Results from the EC RTD ClimateCost Project, in: Watkiss, P. (Ed.), The ClimateCost Project. Final Report. Volume 1: Europe. Stockholm Environment Institute, Stockholm, Sweden.

Moroi, K., Sato, T., 1975. Comparison between procaine and isocarboxazid metabolism in vitro by a liver microsomal amidase-esterase. Biochem. Pharmacol. 24, 1517–1521.

Moshammer, H., Gerersdorfer, T., Hutter, H.-P., Formayer, H., Kromp-Kolb, H., Schwarzl, I., 2009. Abschätzung der Auswirkungen von Hitze auf die Sterblichkeit in Oberösterreich (Endbericht; BOKU-Met Report No. 13), Band 3 der Forschungsreihe „Auswirkungen des Klimawandels auf Oberösterreich" im Auftrag des Umweltlandesrates Rudi Anschober, Land Oberösterreich. Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Meteorologie, Wien, Österreich.

Moshammer, H., Hutter, H.-P., Gerersdorfer, T., Hlava, A., Sprinzl, G., Leitner, B., 2006. Einflüsse der Temperatur auf Mortalität und Morbidität in Wien (Abschlußbericht StartClim2005.A1a).

Medizinische Universität Wien, ZPH, Institut für Umwelthygiene; BOKU, Institut für Meteorologie, Wien, Österreich.

Munich Re, 2013a. NATHAN, Globe of Natural Hazards (DVD).

Munich Re, 2013b. NatCatSERVICE [WWW Document]. URL http://www.munichre.com/de/reinsurance/business/non-life/natcatservice/index.html (accessed 6.10.14).

Muthers, S., Matzarakis, A., Koch, E., 2010b. Summer climate and mortality in Vienna – a human-biometeorological approach of heat-related mortality during the heat waves in 2003. Wiener klinische Wochenschrift 122, 525–531. doi:10.1007/s00508-010-1424-z

Muthers, S., Matzarakis, A., Koch, E., 2010a. Climate Change and Mortality in Vienna – A Human Biometeorological Analysis Based on Regional Climate Modeling. International Journal of Environmental Research and Public Health 7, 2965–2977. doi:10.3390/ijerph7072965

Naucke, T.J., Lorentz, S., Rauchenwald, F., Aspöck, H., 2011. Phlebotomus (Transphlebotomus) mascittii Grassi, 1908, in Carinthia: first record of the occurrence of sandflies in Austria (Diptera: Psychodidae: Phlebotominae). Parasitology research 109, 1161–1164. doi:10.1007/s00436-011-2361-0

Nellemann, C., Mac Devette, M., Manders, T., Eikhout, B., Svihus, B., Prins, A.G., Kaltenborn, B.P., 2009. The environmental food crisis: the environment's role in averting future food crises: a UNEP rapid response assessment. UNEP, Arendal, Norway.

Oberndorfer, S., Fuchs, S., Rickenmann, D., Andrecs, P., 2007. Vulnerabilitätsanalyse und monetäre Schadensbewertung von Wildbachereignissen in Österreich – Vulnerability Analysis and Monetary Loss Assessment of Torrent Events in Austria (No. 139), BFW-Berichte. Naturgefahren und Landschaften BFW (Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald.

OcCC, 2007. Klimaänderung in der Schweiz 2050. Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft. OcCC Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung / ProClim, Bern.

OECD, 2010. Cities and climate change. Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris.

OECD-FAO, 2011. Agricultural Outlook 2011–2020. OECD Publishing and FAO, Paris.

ÖIR – Österreichisches Institut für Raumplanung, 2011. Regional Challenges in the Perspektive of 2020 – Phase 2: Deepening and Braodening the Analysis (Final Report to Contract Study commissioned by European Commission, Directorate General for Regional Policy No. 700322). Spatial Foresightm GmbH, Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Pöyry Energy, Universität für Bodenkultur –Institut für Meteorologie, Vienna, Heisdorf, Bonn.

ÖROK, 2008. Szenarien der Raumentwicklung Österreichs 2030, Materialienband (No. 176/I), ÖROK Schriftenreihe. Österreichische Raumordnungskonferenz, Wien.

ÖROK, 2009. Szenarien der Raumentwicklung Österreichs 2030. Regionale Herausforderungen und Handlungsstrategien (No. 176 / II), ÖROK Schriftenreihe. Österreichische Raumordnungskonferenz, Wien.

ÖROK, 2010. Österreichisches Raumentwicklungskonzept 2011 – Arbeitspapier der AG III „Umwelt – Klimawandel – Ressourcen. ÖROK Österreichische Raumordnungskonferenz.

ÖROK, 2011. ÖROK-Regionalprognosen 2010–2030: Bevölkerung, Erwerbspersonen und Haushalte (Schriftenreihe No. 184). Wien

Penning-Rowsell, E.C., Ashley, R., Evans, E., Hall, J.W., 2004. Foresight Future Flooding: Scientific Summary. Future Risks and Their Drivers (Vol 1. Future risks and their drivers and Vol.2. Managing future risks, plus executive summary). Office of Science and Technology.

Perroud, M., Bader, S., 2013. Klimaänderung in der Schweiz. Indikatoren zu Ursachen, Auswirkungen, Massnahmen. Umwelt-Zustand Nr. 1308. Bundesamt für Umwelt und Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, Bern und Zürich.

Pfister, C., 2003. Ein Blick auf die letzten 500 Jahre, in: OcCC (Ed.), Extremereignisse Und Klimaänderung. OcCC Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung, Bern, pp. 21–24.

Pfurtscheller, L., Lochner, B., Thieken, A., 2008. Cost of alpine hazards (WP8 Final Report), CONHAZ Reports. nstitute of Geography, University of Innsbruck, Climate Service Center, Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Innsbruck / Hamburg.

Poeppl, W., Burgmann, H., Auer, H., Mooseder, G., Walochnik, J., 2012. Leishmania (Viannia) guyanensis infection, Austria. Emerging Infectious Diseases 18, 1533–1535. doi:10.3201/eid1809.111365

Poeppl, W., Herkner, H., Tobudic, S., Faas, A., Auer, H., Mooseder, G., Burgmann, H., Walochnik, J., 2013. Seroprevalence and asymptomatic carriage of Leishmania spp. in Austria, a non-endemic European country: Leishmania seroprevalence in a non-endemic country. Clinical Microbiology and Infection 19, 572–577. doi:10.1111/j.1469-0691.2012.03960.x

Prettenthaler, F., 2010. Ein neues Risikotransfersystem für Naturgefahren in Österreich? Zur Beurteilung des vom Versicherungsverband vorgeschlagenen NatKat-Modells, in: Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (Ed.), Auswirkungen Des Klimawandels Auf Hydrologie Und Wasserwirtschaft in Österreich, ÖWAV, Wien, pp. 145–158.

Prettenthaler, F., Albrecher, H., 2009. Hochwasser und dessen Versicherung in Österreich: Evaluierung und ökonomische Analyse des von der Versicherungswirtschaft vorgeschlagenen Modells NatKat. Joanneum Research, Graz.

Prettenthaler, F., Formayer, H. (Eds.), 2011. Tourismus im Klimawandel: zur regionalwirtschaftlichen Bedeutung des Klimawandels für die österreichischen Tourismusgemeinden, Studien zum Klimawandel in Österreich. Verlag der österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien.

Prettenthaler, F., Vetters, N., 2006. Finanzielle Bewältigung von Naturgefahren: Vorschläge zur Reform des österreichischen Modells (InTeReg Working Paper No. 21-2005). Joanneum Research Forschungsgesellschaft mbH, Graz.

Prettenthaler, F., Vetters, N., 2009. Status quo des Risikotransfersystems für Naturgefahren in Österreich, in: Prettenthaler, F., Albrecher, H. (Eds.), Hochwasser Und Dessen Versicherung in Österreich. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien.

Prettenthaler, F., Gobiet, A., Habsburg-Lothringen, C., Steinacker, R., Töglhofer, C., Türk, A., 2007. Auswirkungen des Klimawandels auf Heiz-und Kühlenergiebedarf in Österreich (Endbericht StartClim2006.F Teilprojekt von StartClim2006). Inst. für Technologie und Regionalpolitik, Institut für Energieforschung - Joanneum Research; Wegener Zentrum für Klima und Globalen Wandel, Inst. für Geophysik und Meteorologie - Universität Graz; Inst. für Meteorologie und Geophysik, Universität Wien, Graz, Austria.

Prettenthaler, F., Habsburg-Lothringen, C., Sterner, C., 2008a. Soziale Aspekte von climate change impacts in Österreich. Erste Beiträge zur Inzidenz der Lasten des Klimawandels.

Prettenthaler, F., Töglhofer, C., Habsburg-Lothringen, C., Türk, C., 2008b. Klimabedingte Änderungen des Heiz- und Kühlbedarfs für Österreich, in: Prettenthaler, F., Gobiet, A., Töglhofer, C. (Eds.), Heizen Und Kühlen Im Klimawandel, Studien Zum Kli-

mawandel in Österreich. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, pp. 13–27.
Prettenthaler, F.E., Kortschak, D., Vetters, N., 2009a. Auswirkungen des NatKat-Modells auf den Österreichischen Katastrophenfonds und die Bundesländer, in: Prettenthaler, F., Albrecher, H. (Eds.), Hochwasser und dessen Versicherung in Österreich: Evaluierung und ökonomische Analyse des von der Versicherungswirtschaft vorgeschlagenen Modells NatKat. Joanneum Research, Graz, pp. 115–123.
Prettenthaler, F., Formayer, H., Aumayer, P., Haas, P., Habsburg-Lothringen, C., Hofstätter, M., Richter, V., Vetters, N., 2009b. Global Change Impact on Tourism. Der sozioökonomische Einfluss des Klimawandels auf den Winter- und Sommertourismus in Österreich. Joanneum Research Forschungsgesellschaft, Institut für Technologie- und Regionalpolitik, Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Meteorologie.
Prettenthaler, F., Albrecher, H., Köberl, J., Kortschak, D., 2012. Risk and Insurability of Storm Damages to Residential Buildings in Austria. The Geneva Papers on Risk and Insurance – Issues and Practice 37, 340–364.
Pröbstl, U., Damm, B., 2009. Wahrnehmung und Bewertung von Naturgefahren als Folge von Gletscheraschwund und Permafrostdegradation in Tourismusdestinationen am Beispiel des Tuxer Tals (Zillertaler Alpen / Österreich) (Endbericht StartClim2008.F Teilprojekt von StartClim2008). Gefördert aus Mitteln des BMLFUW, des BMWF, des BMWFJ, der ÖBF und der Österreichischen Hagelversicherung, Wien.
Pröbstl, U., Jiricka, A., Schauppenlehner, T., 2007. See-Vision: Einfluss von klimawandelbedingten Wasserschwankungen im Neusiedler See auf die Wahrnehmung und das Verhalten von Besucherinnen und Besuchern (Endbericht StartClim2006.D3 Teilprojekt von StartClim2006). Finanziert aus Mitteln des BMLFUW, des BMGFJ, des BMWF, des BMWA und der Österreichischen Hagelversicherung, Wien.
Rabitsch, W., Essl, F. (Eds.), 2010. Aliens: Neobiota und Klimawandel – eine verhängnisvolle Affäre? Bibliothek der Provinz, Weitra.
Regions 2020, Regional Challenges in the Perspective of 2020 [WWW Document]. URL http://regions2020.oir.at/ (accessed 6.7.14).
Reiner, A., Deepen, J., 2012. Einschätzung der Sturmgefährdung in Österreich anhand probabilistischer und stochastischer Modelle, in: Prettenthaler, F.E., Albrecher, H. (Eds.), Sturmschäden: Modellierung der versicherten Schäden in Österreich. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien.
Reiterer, A.F., 2006. Wohnsituation der Bevölkerung, Ergebnisse der Volks-, Gebäude- und Wohnungszählung 2001. Statistik Austria, Wien.
Richter, R., Berger, U.E., Dullinger, S., Essl, F., Leitner, M., Smith, M., Vogl, G., 2013. Spread of invasive ragweed: climate change, management and how to reduce allergy costs. J Appl Ecol 50, 1422–1430. doi:10.1111/1365-2664.12156
Robine, J.-M., Cheung, S.L.K., Le Roy, S., Van Oyen, H., Griffiths, C., Michel, J.-P., Herrmann, F.R., 2008. Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. Comptes rendus biologies 331, 171–178. doi:10.1016/j.crvi.2007.12.001
Rogler, N., Winkler, C., Kueschnig, M., 2011. Ausgewählte Aspekte des Klimarisikos im Bereich Wasserversorgung, in: Prettenthaler, F., Köberl, J., Winkler, C. (Eds.), Klimarisiko Steiermark: erste Schritte zur Anpassungsstrategie. Verlag der österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, pp. 78–82.
Rose, A., 2004. Economic Principles, Issues, and Research Priorities in Hazard Loss Estimation, in: Okuyama, D.Y., Chang, P.S.E. (Eds.), Modeling Spatial and Economic Impacts of Disasters, Advances in Spatial Science. Springer Berlin Heidelberg, pp. 13–36.
Rosenzweig, C., Solecki, W.D., Hammer, S., Mehrota, S., 2011. Climate change and cities: first assessment report of the Urban Climate Change Research Network. Cambridge University Press, Cambridge, New York.
Rudel, E., 2008. Einige Gedanken zur Frage der Zunahme der meteorologischen Extremwerte, in: Böhm, R., Godina, R., Nachtnebel, H.-P., Pirker, O. (Eds.), Auswirkungen Des Klimawandels Auf Die Österreichische Wasserwirtschaft. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV), Wien, pp. 83–89.
Rudolf-Miklau, F., Moser, A., Hübl, J., International Research Society Interpraevent, 2009. Alpine Naturkatastrophen: Lawinen, Muren, Felsstürze, Hochwässer. Leopold Stocker Verlag, Graz.
Ruth, M., Coelho, D., 2007. Understanding and managing the complexity of urban systems under climate change. Climate Policy 7, 317–336. doi:10.1080/14693062.2007.9685659
Schaffner, F., Bellini, R., Petrić, D., Scholte, E.-J., 2012. Guidelines for the surveillance of invasive mosquitoes in Europe, ECDC Technical Report. European Centre for Disease Prevention and Control; Publications Office [of the European Union], Stockholm, Sweden.
Schieferer, W., 2006. Abwicklungsfragen im versicherungsrechtlichen Umfeld von Naturgefahren – Zukunftsperspektive der privaten Naturkatastrophen-Vorsorge nach dem Hochwasserereignis vom 23. August 2005, in: Fuchs, S., Khakzadeh, L.M., Weber, K. (Eds.), Recht Im Naturgefahrenmanagement. Studienverlag.
Schieser, H.-H., 2003. Hagel, in: Extremereignisse Und Klimaänderung, OcCC Bericht: Wissensstand und Empfehlungen. OcCC Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung, Bern, Schweiz, pp. 65–68.
Schubert, R., Schellnhuber, H.J., Buchmann, N., Epiney, A., Grießhammer, R., Kulessa, M., Messner, D., Rahmstorf, S., Schmid, J., 2008. World in Transition: Climate Change as a Security Risk. German Advisory Council on Global Change (WGBU). Earthscan, London, UK and Sterling, VA, USA.
Scott, D., 2006. Global Environmental Change and Mountain Tourism, in: Gössling, S., Hall, C.M. (Eds.), Tourism and Global Environmental Change: Ecological, Social, Economic and Political Interrelationships, Contemporary Geographies of Leisure, Tourism, and Mobility. Routledge, London; New York, pp. 54–75.
Scott, D., Jones, B., Konopek, J., 2007. Implications of climate and environmental change for nature-based tourism in the Canadian Rocky Mountains: A case study of Waterton Lakes National Park. Tourism Management 28, 570–579. doi:10.1016/j.tourman.2006.04.020
Scott, D., Jones, B., Konopek, J., 2008. Exploring potential visitor response to climate-induced environmental changes in Canada's Rocky Mountain National Parks. Tourism Review International 12, 43–56. doi:10.3727/154427208785899939
Seiler, W., 2006. Der Klimawandel im Alpenraum: Trends, Auswirkungen und Herausforderungen, in: BMLFUW (Ed.), Klimawandel Im Alpenraum. Auswirkungen Und Herausforderungen. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, pp. 7–20.

Semenza, J.C., Menne, B., 2009. Climate change and infectious diseases in Europe. The Lancet infectious diseases 9, 365–375. doi:10.1016/S1473-3099(09)70104-5

Serquet, G., Rebetez, M., 2011. Relationship between tourism demand in the Swiss Alps and hot summer air temperatures associated with climate change. Climatic Change 108, 291–300. doi:10.1007/s10584-010-0012-6

Stark, P.D.K., Niedrig, M., Biederbick, W., Merkert, H., Hacker, J., 2009. Die Auswirkungen des Klimawandels. Bundesgesundheitsblatt – Gesundheitsforschung – Gesundheitsschutz 52, 699–714. doi:10.1007/s00103-009-0874-9

Statistik Austria, 2009. Zeitverwendungserhebung 2008/09 – Ein Überblick über geschlechtsspezifische Unterschiede (Endbericht der Bundesanstalt Statistik Österreich an die Bundesministerin für Frauen und Öffentlichen Dienst (No. GZ: BKA-F140.300/0003-II/1/2008). Statistik Austria, Wien.

Statistik Austria, 2011. Siedlungseinheiten [WWW Document]. URL http://www.statistik.at/web_de/klassifikationen/regionale_gliederungen/siedlungseinheiten/index.html (accessed 6.10.14).

Statistik Austria, 2013. Stadtregionen [WWW Document]. URL http://www.statistik.at/web_de/klassifikationen/regionale_gliederungen/stadtregionen/index.html (accessed 6.10.14).

Statistik Austria, WKÖ, BMWFJ, ÖHT, 2011. Tourismus in Österreich 2010. Ein Überblick in Zahlen. Statistik Austria, Wirtschaftskammer Österreich, Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, Österr. Hotel- und Tourismusbank, Wien.

Steiger, R., 2011. The impact of snow scarcity on ski tourism: an analysis of the record warm season 2006/2007 in Tyrol (Austria). Tourism Review 66, 4–13. doi:10.1108/16605371111175285

Steiger, R., 2012. Scenarios for skiing tourism in Austria: integrating demographics with an analysis of climate change. Journal of Sustainable Tourism 20, 867–882. doi:10.1080/09669582.2012.680464

Steiger, R., Abegg, B., 2011. Climate change impacts on Austrian ski areas, in: Borsdorf, A., Stötter, J., Veulliet, E. (Eds.), Managing Alpine Future II. „Inspire and Drive Sustainable Mountain Regions“ – Proceedings of the Innsbruck Conference November 21–23, 2011. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich.

Steiger, R., Abegg, B., 2013. The Sensitivity of Austrian Ski Areas to Climate Change. Tourism Planning & Development 10, 480–493. doi:10.1080/21568316.2013.804431

Steiger, R., Stötter, J., 2013. Climate Change Impact Assessment of Ski Tourism in Tyrol. Tourism Geographies 1–24. doi:10.1080/14616688.2012.762539

Stern, N., 2007. The economics of climate change: the Stern review. Cambridge University Press, Cambridge, UK; New York.

Stiles, R., Loibl, W., Pauleit, S., 2013. UFT-ADI – Urban fabric types and microclimate response – assessment and design improvement (Zwischenbericht. Österreichischer Klima- und Energiefonds). TU Wien, Austrian Institute of Technology GmbH (AIT), TU München, Wien.

Stötter, J., 2007. Zunahme des Schadenspotentials und Risikos in Tirol als Ausdruck der Kulturlandschaftsentwicklung seit den 1950er Jahren, in: Aistleitner, J. (Ed.), Alpine Kulturlandschaft im Wandel: Hugo Penz zum 65. Geburtstag. Innsbrucker Geograph. Ges., Innsbruck, pp. 164–178.

Suklitsch, M., Gobiet, A., Truhetz, H., Leuprecht, A., Themeßl, M., 2007. Klimaschutz Salzburg: Ein regionales Klimaszenario für das Bundesland Salzburg – Ergebnisse. Wegener Zentrum für Klima und Globalen Wandel, Karl-Franzens-Universität Graz, Graz.

Tazi-Preve, I.M., Kytir, J., Lebhart, G., Münz, R., 1999. Bevölkerung in Österreich: demographische Trends, politische Rahmenbedingungen, entwicklungspolitische Aspekte. Institut für Demographie, Österreichische Akademie der Wissenschaften, Wien.

Töglhofer, C., Eigner, F., Prettenthaler, F., 2011. Impacts of snow conditions on tourism demand in Austrian ski areas. Climate Research 46, 1–14. doi:10.3354/cr00939

Töglhofer, C., Formayer, H., Habsburg-Lothringen, C., Prettenthaler, F., Steininger, K., Tobin, A., 2007. Auswirkungen des Klimawandels auf Heiz- und Kühlenergiebedarf in Niederösterreich., in: Formayer, H. (Ed.), Auswirkungen Des Klimawandels in Niederösterreich – NÖ Klimastudie 2007. p. 367.

Unbehaun, W., Pröbstl, U., Haider, W., 2008. Trends in winter sport tourism: challenges for the future. Tourism Review 63, 36–47. doi:10.1108/16605370810861035

UNDP – United Nations Development Programme, 2007. Human Development Report 2007/2008 Fighting climate change. Human solidarity in a divided world, Palgrave MacMillan, New York., in: Human Solidarity in a Divided World, Palgrave MacMillan, New York. UNWTO/UNEP/WMO, 2008: Climate Change and Tourism – Responding to Global Challenges. Madrid: WMO.

UNWTO – World Tourism Organization, UNEP – United Nations Environment Programme, 2008. Climate change and tourism: responding to global challenges. World Tourism Organization; United Nations Environment Programme, Madrid; Paris.

Url, T., 2008. Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurven für Hochwasserkatastrophen in Österreich. WIFO Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung, Wegener Center für Klima und Globalen Wandel, Inst. für Prozesstechnik/TU Graz, KWI Consultants, Inst. für Werkstoffkunde und Prüfung der Kunststoffe, Montanuniversität Leoben, Inst. für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft/TU Wien.

Vetters, N., 2006. Finanzieller Risikotransfer von Hochwasserrisiken (Wissenschaftlicher Bericht No. 9-2006). Weg ener Zentrum für Klima und Globalen Wandel, Karl-Franzens-Universität Graz, Graz.

Walochnik, J., 2009. When sandflies move north. Public Health 30–37.

Walochnik, J., Aspöck, H., 2010. Sandmücken, Leishmanien und Leishmaniosen – neue Dimensionen alter Krankheiten, in: Aspöck, H. (Ed.), Krank Durch Arthropoden., Denisia 30. pp. 673–694.

Watkiss, P., 2011. Aggregate economic measures of climate change damages: explaining the differences and implications. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change 2, 356–372. doi:10.1002/wcc.111

Watkiss, P., Downing, T., 2008. The social cost of carbon: Valuation estimates and their use in UK policy. Integrated Assessment 8, 85–105.

Watkiss, P., Hunt, A., 2010. The costs and benefits of adapation in Europe: review summary and synthesis, ClimateCost Policy Brief No 2.

Watkiss, P., Hunt, A., 2012. Projection of economic impacts of climate change in sectors of Europe based on bottom up analysis: human health. Climatic Change 112, 101–126. doi:10.1007/s10584-011-0342-z

Weissenböck, H., Hubálek, Z., Bakonyi, T., Nowotny, N., 2010. Zoonotic mosquito-borne flaviviruses: Worldwide presence of agents with proven pathogenicity and potential candidates of future emerging diseases. Veterinary Microbiology 140, 271–280. doi:10.1016/j.vetmic.2009.08.025

WHO – World Health Organization, 2009. Protecting health from climate change. Connecting science, policy and people. WHO Press, Geneva, Switzerland.

Williamson, L.E., Connor, H., Moezzi, M., 2009. Climate-proofing energy systems. Helio International.

WKO, 2012. Factsheet – Die Österreichischen Seilbahnen in Zahlen (Winter 2010/11).

Women's Environmental Network, 2010. Gender and the Climate Change Agenda. London, UK.

Zebisch, M., Tappeiner, U., Elmi, M., Hoffmann, C., Niedrist, G., Pedoth, L., Pinzger, S., Pistocchi, A., Tasser, E., 2011. Klimareport Südtirol. EURAC (Europäische Akademie Bozen), Bozen.

ZENAR, 2003. Ereignisdokumentation Hochwasser August 2002, Plattform Hochwasser. ZENAR, Universität für Bodenkultur Wien; BM für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.

Zuvela-Aloise, M., Koch, R., Nemec, J., Anders, I., Barbara, F., Koßmann, M., 2012. Zukunftsszenarien der Wärmebelastung in Wien. Poster im Zuge des 13. Klimatags, 14.–15. Juni 2012.

Band 3: Klimawandel in Österreich: Vermeidung und Anpassung

Volume 3: Climate Change in Austria: Mitigation and Adaptation

Band 3 Kapitel 1: Emissionsminderung und Anpassung an den Klimawandel

Volume 3 Chapter 1: Mitigation and Adaptation to Climate Change

Koordinierende LeitautorInnen
Birgit Bednar-Friedl, Klaus Radunsky

LeitautorInnen
Maria Balas, Martin Baumann, Barbara Buchner, Veronika Gaube, Willi Haas, Stefan Kienberger, Martin König, Angela Köppl, Lukas Kranzl, Julian Matzenberger, Reinhard Mechler, Nebojsa Nakicenovic, Ines Omann, Andrea Prutsch, Arno Scharl, Karl Steininger, Reinhard Steurer, Andreas Türk

Beiträge von
Christoph Campregher, Hermann Knoflacher, Stefan Schleicher, Julia Wesely

Für den Begutachtungsprozess
Sabine Fuss

Inhalt

ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Kapitel werden sowohl die Erfordernisse und Chancen, als auch die Beschränkungen und Barrieren bezüglich Emissionsminderung und Anpassung an den Klimawandel aus österreichischer Perspektive beschrieben. Im Rahmen dessen werden auch die aus nationaler Perspektive relevanten Informationen für die globale Ebene, bzw. jene der Europäischen Union (EU) dargestellt. Abschnitt 1.1 diskutiert in diesem Sinne zunächst die Emissionsminderungsziele auf globaler Ebene, sowie die Potenziale von bereits verfügbaren oder in Entwicklung befindlichen Technologien, um diese Ziele zu erreichen, sowie die damit einhergehenden Kosten. Insbesondere wird auf die Entwicklungen des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) und des United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) eingegangen und es werden Instrumente und Maßnahmen auf europäischer und österreichischer Ebene diskutiert. Abschnitt 1.2 über Klimawandelanpassung beschäftigt sich mit den unterschiedlichen Konzepten auf internationaler Ebene, den Strategien auf europäischer und nationaler Ebene und beschreibt die verschiedenen kurz-, mittel- und langfristigen Formen von Anpassung. Ebenso werden die Kosten des Nichthandelns thematisiert. Weiters wird auf die erreichten Fortschritte seitens des IPCC und der UNFCCC sowie der EU (Grün- und Weißbuch) und nationalen Politik (Nationale Anpassungsstrategie) eingegangen, insbesondere auf den Fortschritt bei der Planung, Umsetzung, und Integration in vulnerablen Sektoren. Abschnitt 1.3 identifiziert Synergien und Abwägungen (Trade-offs) zwischen Emissionsminderung und Anpassung und zeigt die Notwendigkeit eines integrativen Ansatzes auf. Es wird auch auf die Notwendigkeit der Berücksichtigung von Klimaschutz und Anpassung in anderen Politikfeldern eingegangen. Abschnitt 1.4 identifiziert Barrieren effektiver Emissionsminderung und Anpassung und zwar auf der individuellen, gesellschaftlichen, politischen und wirtschaftlichen Ebene. Weiters wird auf Barrieren hinsichtlich fehlendem Wissen und Unsicherheiten eingegangen. Zum Abschluss werden Ansätze zur Überwindung dieser Barrieren sowie Erfordernisse für zukünftige Forschung dargestellt.

SUMMARY

This chapter focuses on the needs and opportunities as well as the constraints and barriers with respect to mitigation and adaptation to climate change. While the chapter concentrates mainly on Austria, information is provided on the global and EU level to the extent they are relevant for Austria. Section 1.1 discusses the targets already specified for mitigation at the global level, as well as technologies that are already available or are emerging with the potential to meet the challenges and associated costs. In particular, the progress achieved by IPCC and UNFCCC bodies, as well as EU policies and national scale policies and measures are reviewed. Section 1.2, on adaptation to climate change, addresses the different concepts developed at the international scale, reviews progress on the EU and Austrian national adaptation strategy, and characterizes the different types of adaptation relevant over short, medium and long term timescales. The costs of inaction are also addressed. Again, progress achieved by IPCC and UNFCCC bodies, as well as EU policies (green and white papers, etc.) and national scale policies and measures (national adaptation strategy) will be reviewed. This includes the progress made on adaptation planning, implementation, and integration in vulnerable sectors. Section 1.3 highlights the synergies and trade-offs that may emerge among adaptation and mitigation and hence explains the importance of a holistic approach. This also includes a discussion of mainstreaming of mitigation and adaptation into other policy areas. Section 1.4 identifies the barriers for mitigation and adaptation, including obstacles at the individual, social, political and economic levels. Moreover, barriers of insufficient knowledge and uncertainties are addressed. Finally, approaches for overcoming these barriers are summarized and needs for future research are highlighted.

KERNAUSSAGEN

- Treibhausgasemissionen führen zu deutlicher globaler Erwärmung.

Die globalen Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) steigen weiterhin entlang des „Business As Usual"-Pfads und werden sich, wenn sich dieser Trend fortsetzt, bis zur Mitte des Jahrhunderts verdoppelt haben (GEA, 2012; IEA, 2012) (sehr hohes Vertrauen). Eine Stabilisierung des Anstiegs der globalen Jahresmitteltemperatur unter 2 °C bis zum Ende des Jahrhunderts (im Vergleich zum vorindustriellem Temperaturniveau) erfordert jedoch bis zur Mitte des Jahrhunderts eine Reduktion der globalen THG-Emissionen um zumindest 50 % der derzeitigen Emissionen im globalen Durchschnitt bzw. um bis zu 90 % in industrialisierten Ländern (IPCC, 2007e) (hohes Vertrauen).

- Globale Erwärmung um 4 °C führt zu drastischen Veränderungen.

Die Veränderung der globalen Jahresdurchschnittstemperatur im Bereich von 4 °C und darüber entspräche je-

ner des Übergangs von der Eiszeit zur Zwischeneiszeit (vgl. Band 1; IPCC, 2007f) (hohes Vertrauen). Eine um 4 °C erwärmte Erde wäre etwa im Vergleich zu den letzten 10 000 Jahren, die zum Hervorgehen der Zivilisationen führten, eine Welt mit kaum beherrschbaren Folgen für Natur und Gesellschaft (WBGU, 2011) (sehr hohes Vertrauen). Auch eine Erwärmung um 2 °C wäre mit signifikanten Veränderungen verbunden (sehr hohes Vertrauen), stellt aber einen Schwellenwert dar, bei dem katastrophalere Folgen vermieden werden könnten (IPCC, 2007d; WBGU, 2011) (mittleres Vertrauen).

- Bemühungen bezüglich Emissionsminderung und Anpassung in Österreich und der EU hinken gegenüber den politischen Zielen (2 °C-Ziel, Nachhaltigkeit) hinterher.

Sowohl Maßnahmen zur Emissionsminderung als auch zur Anpassung sind für jegliches Stabilisierungsniveau des globalen Temperaturanstiegs unbedingt erforderlich (sehr hohes Vertrauen). Sollen durch den Klimawandel ausgelöste, drastische Veränderungen vermieden werden, wird das nur gelingen, wenn wohlhabendere Länder wie Österreich, die über größere Möglichkeiten zur Emissionsminderung verfügen, beginnen, entschiedene Schritte zur Emissionsminderung zu setzen (hohes Vertrauen).

- 2 °C-Ziel kann wahrscheinlich nur mehr durch den Einsatz von bisher nicht eingesetzter Technologie erreicht werden.

Die Notwendigkeit einer unverzüglichen und weitgehenden Reduktion der THG-Emissionen zur Stabilisierung des Klimas (bei jeglichem Niveau) ist seit Jahrzehnten bekannt (UNFCCC, 1992). Dennoch sind die globalen Emissionen seitdem trotzdem fortlaufend gestiegen. Wenn eine Stabilisierung bei 2 °C erreicht werden soll (Meinshausen et al., 2009), dürfen die kumulativen globalen Emissionen etwa 750 Gt CO_2-Äq. nicht übersteigen (IPCC, 2007e) (hohes Vertrauen). Ein Überschreiten dieses Niveaus impliziert, dass CO_2 aus der Atmosphäre entfernt werden muss, beispielsweise durch Aufforstung oder Biomassenutzung in Verbindung mit CO_2-Abscheidung und -Speicherung (Carbon Capture and Storage, CCS) (hohes Vertrauen).

- Die Europäische Union hat zahlreiche klima- und energiepolitische Maßnahmen bis 2020 gesetzt, bis 2050 sind hingegen erst Zielvorgaben formuliert.

Die EU ist grundsätzlich bereit, ihre Emissionen in einem Ausmaß zu senken, welches im Einklang mit der Einhaltung des 2 °C-Zieles steht (Reduktion der THG-Emissionen um 80-95 % bis 2050). Allerdings wird die Umsetzung an politische Forderungen an andere Staaten geknüpft: Die EU ist bereit, ihr Reduktionsziel bis 2020 von derzeit 20 % auf 30 % zu erhöhen, wenn Staaten außerhalb der EU ebenfalls ambitionierte Reduktionsziele festlegen. Da dies aber bislang nur in unzureichendem Maße erfolgt ist, führt dies dazu, dass die EU möglicherweise bis 2020 keine für das 2050-Ziel ausreichende Emissionsminderung erreichen wird (mittleres Vertrauen). Dennoch haben einige europäische Länder (Großbritannien, Dänemark, Finnland, Portugal und Schweden) bereits konkrete Ziele zur Emissionsminderung für die Zeit bis 2050 vorgelegt, nicht jedoch Österreich.

- Erfüllung der österreichischen Kyoto-Ziele nur durch Zukauf.

Für die österreichische Klimapolitik stellen die energie- und klimapolitischen Vorgaben der EU die wesentliche Leitlinie dar. Im Gegensatz zur Mehrheit der anderen EU-Mitgliedstaaten (darunter Deutschland, Großbritannien, Frankreich, Schweden) sind die THG-Emissionen in Österreich allerdings deutlich gestiegen. Damit konnte das österreichische Kyoto-Ziel nicht durch heimische Emissionsreduktionen erfüllt werden. Eine formale Erfüllung wurde durch .Zertifikatzukäufe im Ausland im Ausmaß von etwa 80 Mt CO_2-Äq. mit einem Mittelaufwand von rund 500 Mio. € erreicht werden.

- Zur Erfüllung zukünftiger Klimaschutz-Ziele sind stärkere Anstrengungen erforderlich.

Das im Jahr 2011 verabschiedete österreichische Klimaschutzgesetz ist die einzig ernstzunehmende Initiative des Bundes der letzten Jahre, es schafft allerdings nur einen allgemeinen Rahmen. Wenn nicht eine deutliche Kehrtwende in der österreichischen Klimapolitik erfolgt, welche von allen entscheidenden AkteurInnen, einschließlich der Bundesländer, sowie der Bevölkerung mitgetragen wird, läuft Österreich Gefahr sein 2020-Ziel nur durch Zukäufe erfüllen zu können (mittleres Vertrauen).

- Weltweit werden bereits jetzt erhebliche Auswirkungen durch den Klimawandel festgestellt, die mit steigender Erwärmung auch in Europa zunehmen werden.

Die dem Klimawandel zuzuschreibenden globalen Schäden liegen deutlich jenseits von 100 Milliarden € pro Jahr und könnten sogar jenseits von 1 Billion € pro Jahr liegen (Greenstone et al., 2011) (mittleres Vertrauen). Für Europa wurden die Kosten aus Schäden durch extreme Wetterereignisse im Jahr 2080 auf 20 Mrd. € (bei einer globalen Erwärmung von 2,5 °C) bis 65 Mrd. € (bei einer globalen Erwärmung

von 5,4 °C und starkem Anstieg des Meeresspiegels) geschätzt (Ciscar et al., 2011) (geringes Vertrauen). Diese Kostenschätzungen sind jedoch mit vielen Unsicherheiten behaftet und nicht-monetarisierbare Schäden (wie z. B. der Verlust einzigartiger Lebensräume) werden nicht berücksichtigt. Wie für viele andere Länder liegen auch für Österreich detaillierte Studien zu den Kosten des Klimawandels bislang nur für ausgewählte Sektoren bzw. Bereiche vor.

- Rasches Handeln erhöht Spielräume und spart künftige Kosten.

Trotz bestehender Unsicherheiten über das konkrete Ausmaß der Klimawandelfolgen für die unterschiedlichen Regionen und Bereiche ist die frühzeitige Planung und Durchführung von konkreten Anpassungsmaßnahmen von großer Wichtigkeit (Smith et al., 2011) (mittleres Vertrauen). Eine Anpassung lediglich an die in der Vergangenheit aufgetretenen Ereignisse ist in vielen Fällen nicht als ausreichend zu bewerten. Dies gilt beispielsweise für Hitzewellen sowie für Hochwasserereignisse gemäß den Aussagen des IPCC (2012a) (hohes Vertrauen). Auch wenn Klimawandelfolgen erst in ein paar Jahrzehnten massiver auftreten werden, verringert ein Zuwarten die Möglichkeit für eine erfolgreiche Anpassung und erhöht gleichzeitig die damit verbundenen Kosten (IPCC, 2007b) (hohes Vertrauen).

- Mehrjähriger partizipativer Prozess zur Erarbeitung der österreichischen Anpassungsstrategie.

Mit dem Ministerratsbeschluss der österreichischen Strategie zur Anpassung an den Klimawandel im Oktober 2012 wurde ein wesentlicher Meilenstein im Anpassungsprozess erreicht. Anpassung an die Folgen des Klimawandels ist – ebenso wie Emissionsminderung – eine Querschnittsmaterie und erfordert ein kooperatives Vorgehen zwischen unterschiedlichen Bereichen und Entscheidungsebenen (von lokal bis global, von öffentlich bis privat). Beispielgebend wird dies in Deutschland in sieben Regionen im Rahmen der Projektinitiative KLIMZUG durchgeführt.

- Es bestehen Synergien zwischen Maßnahmen zur Emissionsminderung und Anpassung, die genutzt werden können.

Die Handlungsempfehlungen der österreichischen Klimawandelanpassungsstrategie gehen in Richtung emissionsarmer und – wo möglich – synergistischer Anpassungsmaßnahmen (Integration von Klimaschutz und Anpassung). Dieser anvisierte Pfad wird dann erfolgreich beschritten, wenn zum einen die Potenziale für das Mainstreaming von Anpassung in wesentlichen Politikbereichen (z. B. Energie-, Verkehrs-, Raumordnungs- oder Landwirtschaftspolitik) optimal genutzt werden können (hohes Vertrauen) und zum anderen die globale Klimaentwicklung nicht in Richtung einer +4 °C-Welt geht (mittleres Vertrauen).

- Zahlreiche Barrieren bremsen Fortschritte bezüglich Klimaschutz und Anpassung.

Trotz gut belegter Vorhersagen zu Klimawandelfolgen mangelt es international aber auch in Österreich an entschiedenem Handeln zum Schutz des Klimas und zur Anpassung an den Klimawandel. Die Literatur hat zahlreiche auch für Österreich relevante institutionelle, wirtschaftliche, soziale und Unsicherheits- bzw. Wissensbarrieren identifiziert (hohes Vertrauen).

- Eine Überwindung der Barrieren erfordert einen umfassenden Ansatz, der sowohl institutionelle als auch Verhaltensänderungen beinhaltet.

Beispiele für Ansätze zur Überwindung der Barrieren sind eine umfassende Reform der Verwaltungsstrukturen in Hinblick auf die zu bewältigenden Aufgaben, die korrekte Bepreisung von Produkten und Dienstleistungen entsprechend ihrer Klimawirkung, sowie entsprechende ordnungsrechtliche Rahmenbedingungen, eine stärkere Einbeziehung von VerantwortungsträgerInnen einschließlich der Zivilgesellschaft und der Wissenschaft in Entscheidungsfindungsprozesse, die gezielte Steigerung des klima- und umweltbezogenen Wissens, sowie das Schließen handlungsrelevanter Wissenslücken (hohes Vertrauen).

1 Emissionsminderung und Anpassung an den Klimawandel

1 Climate Change Adaptation and Mitigation

Dieses Kapitel bietet einen Überblick über den aktuellen Stand der Forschung zu Emissionsminderung und Anpassung sowie deren Umsetzung. Da die österreichische Perspektive hierbei von der globalen und europäischen abhängig ist, wird in den Abschnitten 1.1 zu Emissionsminderung und 1.2 zu Anpassung zunächst die globale Ebene gefolgt von der europäischen Ebene betrachtet, um schließlich auf die österreichische Ebene einzugehen. Während Emissionsminderung und Anpassung ursprünglich meist getrennt voneinander betrachtet wurden, reifte in den letzten Jahren die Einsicht, dass es einen erheblichen Abstimmungsbedarf zwischen beiden gibt; dieser wird

in Abschnitt 1.3 behandelt. Abschnitt 1.4 geht schließlich der Frage nach, welche Barrieren bei der Umsetzung von Emissionsminderungs- und Anpassungsmaßnahmen entstehen und welche Überlegungen es zu deren Überwindung gibt (vgl. auch Band 3, Kapitel 6 zu den notwendigen Transformationsprozessen).

1.1 Erfordernisse und Chancen für Emissionsminderung (Mitigation)
1.1 Mitigation requirements and opportunities

Unter Emissionsminderung (engl.: Mitigation) von THG-Emissionen, werden technologischer Wandel und die Veränderung von Aktivitäten zur Reduktion des Ressourcenverbrauchs und der Emissionen pro produzierter Einheit verstanden. Es wird darauf abgezielt, Klimaänderungen durch Management der Einflussfaktoren zu verringern (IPCC, 2011).

Im Gegensatz dazu beschreibt Klimawandelanpassung (engl.: Adaptation) Initiativen und Maßnahmen um die Verwundbarkeit gegenüber akuten oder erwarteten Auswirkungen des Klimawandels zu reduzieren oder die Resilienz von Mensch-Umwelt-Systemen gegenüber diesen zu erhöhen, beispielsweise durch Hochwasserschutz oder die Ansiedelung von angepassten Tier- und Pflanzenarten (IPCC, 2011).

Minderungs- und Anpassungsmaßnahmen können sich sowohl ergänzen, substituieren als auch unabhängig voneinander wirken (IPCC, 2007b).

1.1.1 Die globale Perspektive bezüglich Emissionsminderung

Zentrale politische Emissionsminderungsziele auf globaler Ebene

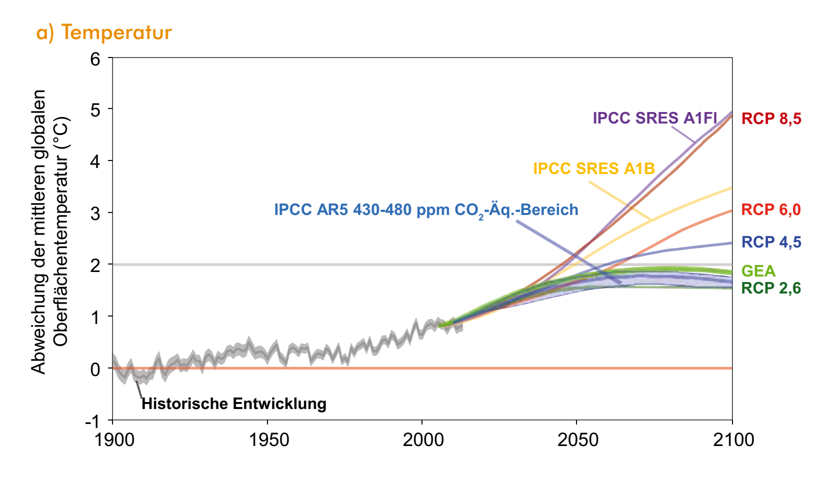
Auf globaler Ebene wurde in der UN-Klimarahmenkonvention (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) 1992 das Ziel definiert „die Stabilisierung der THG-Konzentrationen in der Atmosphäre auf einem Niveau zu erreichen, auf dem eine gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems verhindert wird. Ein solches Niveau sollte innerhalb eines Zeitraums erreicht werden, der ausreicht, damit sich die Ökosysteme auf natürliche Weise den Klimaänderungen anpassen können, die Nahrungsmittelerzeugung nicht bedroht wird und die wirtschaftliche Entwicklung auf nachhaltige Weise fortgeführt werden kann“ (UNFCCC, 1992, Art. 2).

Verbindliche Emissionsziele wurden durch die UNFCCC erstmals im Kyoto-Protokoll auf der 3. Klimakonferenz (Conference of Parties, COP 3) Ende 1997 beschlossen (UNFCCC, 1997). Darin verpflichten sich Industriestaaten („Annex I-Länder“), darunter auch die EU, ihre Emissionen bis Ende 2012 durchschnittlich um 5,2 % im Vergleich zum Basisjahr 1990 zu reduzieren. Einige in Entwicklung befindliche Länder wie China und Indien sind jedoch von den Zielen ausgenommen, andere Länder, wie die USA, haben das Protokoll nicht ratifiziert und Kanada stieg als erstes Land 2011 aus dem Kyoto-Protokoll aus. Weitere Kernstücke des Protokolls sind ein Kontrollmechanismus für die Einhaltung der Emissionsbeschränkungen und die Berücksichtigung von flexiblen Instrumenten bei der Zielerreichung. Diese beinhalten den internationalen Handel mit Emissionsrechten und nachgewiesene Reduktionen aus Projekten in Schwellen- und Entwicklungsländern (Kyoto-Protokoll, UNFCCC, 1997).

Seit 2005 wird über ein Kyoto-Nachfolgeprotokoll verhandelt, da die im Kyoto-Protokoll festgeschriebenen Ziele nur die Periode 2008 bis 2012 umfassen. Auf der Weltklimakonferenz im Dezember 2007 in Bali wurde ein Zwei-Jahres-Prozess in die Wege geleitet, der 2009 zu einem neuen Klimaabkommen hätte führen sollen. Nachdem die Verhandlungen in Kopenhagen im Dezember 2009 keinen Erfolg zeigten, einigte sich eine Kernverhandlungsgruppe mit den USA, China, Indien, Südafrika und Brasilien auf den Copenhagen Accord, der die Basis für eine neue Architektur in der Klimapolitik darstellt. Diese Kopenhagen-Architektur beinhaltet die Ankündigung von freiwilligen Emissionsbeschränkungen durch die einzelnen Staaten ohne einen übergreifenden Berichts- und Kontrollvorgang sowie Absichtserklärungen für den Transfer von Technologien und Finanzhilfen an die am schwersten betroffenen Entwicklungsländer. Der Copenhagen Accord wurde Teil des UN-Verhandlungsprozesses. Vor allem die EU versuchte – in Anlehnung zu Kyoto – der UN eine möglichst starke Rolle zuzuweisen.

Eine Einigung über die Fortführung des Kyoto-Protokolls in einer zweiten Verpflichtungsperiode ab 2013 wurde in der 17. Klimakonferenz (COP 17 in Durban) Ende 2011 erreicht. Gleichzeitig wurde das 2 °C-Ziel, die globale Erwärmung bis 2100 mit 1,5–2 °C (verglichen mit dem vorindustriellem Temperaturniveau) zu begrenzen, bestätigt (UNFCCC, 2012a).

Verbindliche Ziele für die Periode 2013 bis Ende 2020 wurden in der COP 18 (in Doha) beschlossen (UNFCCC, 2012b), wobei die teilnehmenden Vertragsstaaten jedoch nur rund 15 % der globalen Emissionen ausmachen. Gleichzeitig wurde beschlossen bis 2015 ein verbindliches Klimaübereinkommen aller Länder für die Periode nach 2020 zu erarbeiten,



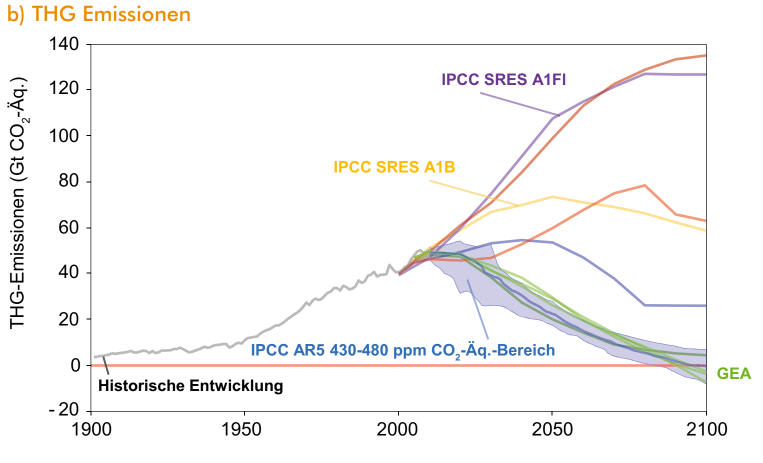


Abbildung 1.1 a Mittlere globale Oberflächentemperatur (°C), historische Entwicklung und zwei IPCC SRES Szenarien ohne Emissionsminderung (A1B und A1F1; Nakicenovic et al., 2000) die bei etwa 5 °C und knapp über 3 °C Temperaturanstieg im Jahr 2100 liegen (im Vergleich zum Durchschnitt der ersten Dekade des 20. Jhdt.), vier neue RCP Emissionsminderungsszenarien welche für den Fünften Sachstandsbericht (AR5) des IPCC entwickelt wurden (8,5; 6,0; 4,5 und 2,6; IPCC, 2014), 42 Global Energy Assessment (GEA) Emissionsminderungsszenarien und der Bereich der IPCC AR5 Szenarien die alle die Temperaturveränderung bis 2100 auf 2 °C stabilisieren

Figure 1.1 a Global mean temperature (°C), historical development and two IPCC SRES scenarios without emissions mitigation (A1B and A1F1; Nakicenovic et al., 2000) leading to about 5 °C and just above 3 °C temperature increase by 2100 (in comparison to the average of the first decade of the 20th century), four new RCP emissions mitigation scenarios developed for the IPCC Fifth Assessment Report (AR5) (8.5, 6.0, 4.5 and 2.6; IPCC, 2014), 42 Global Energy Assessment (GEA) emissions mitigation scenarios and the range of IPCC AR5 scenarios that all stabilize temperature change at 2 °C by 2100

Abbildung 1.1 b Entwicklung der Primärenergie in einem der GEA-Emissionsminderungspfade (mit dem Auslaufen von Kernenergie), der zu einer Stabilisierung der durchschnittlichen globalen Temperatur von 2 °C über vorindustriellem Niveau führt. Quelle: GEA (2012)

Figure 1.1 b Development of primary energy in one of the GEA-mitigation pathways (with a nuclear phase-out) that leads to the stabilization of global mean temperature at 2 °C mean global temperature increase above the pre-industrial levels. Source: GEA (2012)

um unter einem Temperaturanstieg von 2 °C zu bleiben (Weiterführung der Durban-Plattform) (UNFCCC, 2012c).

Entwicklungspfade der globalen Emissionsminderungsmaßnahmen

Bisher ist die globale Mitteltemperatur, ausgehend vom vorindustriellen Niveau um etwa 0,9 °C gestiegen (vgl. Band 1, Kapitel 3). Die Notwendigkeit unverzüglicher und weitgehender Reduktion der THG-Emissionen, um eine Stabilisierung des Klimas (bei jeglichem Niveau) zu erreichen ist seit Jahrzehnten bekannt. Dennoch sind die globalen Emissionen seither fortlaufend gestiegen und folgen einem Business-as-Usual-Pfad der, wenn sich dieser Trend fortsetzt, bis zur Mitte des Jahrhunderts zu einer Verdoppelung der Emissionen führt (GEA, 2012; IEA, 2012).

Die Entwicklung der globalen THG über die letzten zwei Jahrzehnte zeigte eine starke Übereinstimmung mit dem IPCC SRES A1FI Szenario (Nakicenovic et al., 2000; IPCC 2007e, siehe Abbildung 1.1a, vgl. Box 1.1), was zu einem Temperaturanstieg von 5 °C bis Ende des Jahrhunderts führt (verglichen zum Durchschnitt der ersten Dekade des 20. Jhdt.). Eine vollständige Umsetzung der in Cancun und im Rahmen des Copenhagen Accords gesetzten freiwilligen Emissionsminderungsziele, korrespondiert mit dem IPCC SRES A1B Szenario, das zu einer globalen Erwärmung von über 4 °C bis Ende des Jahrhunderts führt (vgl. IBRD, 2012) und ist somit nicht ausreichend, um den Temperaturanstieg mit 2 °C zu limitieren.

Um eine Stabilisierung der globalen Jahresmitteltemperatur auf 2 °C (verglichen zum Durchschnitt der ersten Dekade des 20. Jhdt.) bis zum Ende des Jahrhunderts zu erreichen, muss bis 2050 eine Reduktion der globalen THG-Emissionen um zumindest rund 30–70 % im Vergleich zu den Emissionen 2010 erreicht werden (IPCC, 2014; siehe Abbildung 1.1b). Der „IPCC Bereich“ in Abbildung 1.1.b umfasst THG-Emissionen aller Szenarien in der Literatur, welche die Konzentrationen zwischen 430 und 480 ppm CO_2-Äq., und infolge dessen den Temperaturanstieg auf 2 °C, stabilisieren, wobei die

Box 1.1: Die Emissions-Szenarien des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)
Box 1.1: Emission scenarios by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

Sonderbericht über Emissions-Szenarien – SRES (Nakicenovic et al. 2000 zit. n.: IPCC 2007f)

A1. Die A1-Modellgeschichte bzw. -Szenarien-Familie beschreibt eine zukünftige Welt mit sehr raschem Wirtschaftswachstum, einer Mitte des 21. Jahrhunderts kulminierenden und danach rückläufigen Weltbevölkerung sowie eine rasche Einführung neuer und effizienterer Technologien. Wichtige grundlegende Themen sind Annäherung von Regionen, Entwicklung von Handlungskompetenz sowie zunehmende kulturelle und soziale Interaktion bei gleichzeitiger substantieller Verringerung regionaler Unterschiede des Pro-Kopf-Einkommens. Die A1-Szenarien- Familie teilt sich in drei Gruppen auf, die unterschiedliche Ausrichtungen technologischer Änderungen im Energiesystem beschreiben. Die drei A1-Gruppen unterscheiden sich in ihrer technologischen Hauptstoßrichtung: fossil-intensiv (A1FI), nichtfossile Energiequellen (A1T) oder eine ausgewogene Nutzung aller Quellen (A1B) (wobei ausgewogene Nutzung definiert ist, als eine nicht allzu große Abhängigkeit von einer bestimmten Energiequelle und durch die Annahme eines ähnlichen Verbesserungspotentials für alle Energieversorgungs- und -verbrauchstechnologien).

A2. Die A2-Modellgeschichte bzw. -Szenarien-Familie beschreibt eine sehr heterogene Welt. Das Grundthema ist Autarkie und Bewahrung lokaler Identitäten. Regionale Fruchtbarkeitsmuster konvergieren nur sehr langsam, was eine stetig zunehmende Bevölkerung zur Folge hat. Die wirtschaftliche Entwicklung ist vorwiegend regional orientiert, das Pro-Kopf-Wirtschaftswachstum und technologische Veränderungen sind sowohl bruchstückhafter als auch langsamer als in anderen Modellgeschichten.

B1. Die B1-Modellgeschichte bzw. -Szenarien-Familie beschreibt eine sich näher kommende Welt, mit der gleichen, Mitte des 21. Jahrhunderts kulminierenden und danach rückläufigen Weltbevölkerung wie in der A1-Modellgeschichte, jedoch mit raschen Änderungen der wirtschaftlichen Strukturen in Richtung einer Dienstleistungs- und Informationswirtschaft, bei gleichzeitigem Rückgang des Materialverbrauchs und Einführung von sauberen und Ressourcen-effizienten Technologien. Das Schwergewicht liegt auf globalen Lösungen für eine wirtschaftliche, soziale und umweltgerechte Nachhaltigkeit, einschließlich erhöhter sozialer Gerechtigkeit, jedoch ohne zusätzliche Klimainitiativen.

B2. Die B2-Modellgeschichte bzw. -Szenarien-Familie beschreibt eine Welt mit Schwerpunkt auf lokalen Lösungen für eine wirtschaftliche, soziale und umweltgerechte Nachhaltigkeit. Es ist eine Welt mit einer stetig, jedoch langsamer als im A2-Szenario, ansteigenden Weltbevölkerung, wirtschaftlicher Entwicklung auf mittlerem Niveau und weniger raschem, dafür vielfältigerem technologischem Fortschritt als in den B1- und A1-Modellgeschichten. Obwohl das Szenario auch auf Umweltschutz und soziale Gerechtigkeit ausgerichtet ist, liegt der Schwerpunkt auf der lokalen und regionalen Ebene.

Repräsentative Konzentrationspfade (Moss et al., 2010, Van Vuuren et al., 2011)

Im Fünften Sachstandsbericht des IPCC wird dazu übergegangen, mögliche zukünftige Emissionspfade durch eine Matrix an Szenarien zu unterlegen, die durch 1) Repräsentative Konzentrationspfade (Representative Concentration Pathways, RCPs), 2) Sozio-ökonomische Entwicklungspfade (Shared Socio-Economic reference Pathways, SSPs) und 3) Klimapolitische Rahmenbedingungen (Shared climate Policy Assumptions, SPAs) gegeben ist (van Vuuren et al., 2011). Dadurch werden der Grad der anthropogenen Beeinflussung des Klimasystems, die Verfasstheit der Zivilisation sowie der politische Handlungsdruck Adaptions- und Mitigationsmaßnahmen umzusetzen, bestimmten Szenarien zugeordnet. Im Unterschied zu den SRES-Szenarien werden in den RCPs selbst somit keine sozio-ökonomischen Entwicklungspfade festgelegt, sondern Projektionen für den Strahlungsantrieb im Jahr 2100 gesetzt (Beispielsweise führt RCP 8.5 zu einer Veränderung von +8,5 W/m^2 im Jahr 2100).

Tabelle 1.1 Möglichkeiten zur Emissionsminderung mit großem Potenzial auf globaler Ebene. Quelle: nach IPCC (2007)

Table 1.1 Mitigation options with large potential at the global level. Source: adapted from IPCC (2007)

Sektor	Aktuell auf dem Markt befindliche Schlüsseltechnologien und -praktiken zur Emissionsminderung	Schlüsseltechnologien zur Emissionsminderung, die laut Projektionen bis 2030 auf den Markt kommen
Energieversorgung	Erhöhte Versorgungs- und Verteilungseffizienz; Brennstoffwechsel von Kohle zu Gas; Kernenergie; erneuerbare Energien für Wärme und Strom (Wasserkraft, Solarenergie, Windkraft, Erdwärme und Biomasse); Kraft-Wärme-Kopplung; frühe Anwendung von CO_2-Abtrennung und -Speicherung (CCS; z. B. Speicherung von aus Erdgas entferntem CO_2)	CCS für gas-, biomasse- oder kohlebetriebene Kraftwerke; weiterentwickelte Kernenergie; weiterentwickelte erneuerbare Energien, einschl. Gezeiten- und Wellenkraftwerke; solarthermische Energie (CSP – concentrating solar power) und solare Photovoltaik
Verkehr	Treibstoffeffizientere Fahrzeuge; Hybridfahrzeuge; sauberere Dieselfahrzeuge; Biotreibstoffe; Verlagerung vom Straßenverkehr auf die Schiene und öffentliche Verkehrssysteme; Landnutzungs- und Verkehrsplanung; nicht-motorisierter Verkehr (Fahrradfahren, Zufußgehen); schnelle öffentliche Verkehrssysteme	Biotreibstoffe zweiter Generation; effizientere Flugzeuge; durch zuverlässigere Batterien weiterentwickelte Elektro- und Hybridfahrzeuge mit höherer Leistung und Reichweite
Gebäude	Effiziente Beleuchtung und Ausnutzung des Tageslichts; effizientere Elektrogeräte, Heiz- und Kühlvorrichtungen; nicht-fossile Heizsysteme, Wärmerückgewinnung, weiterentwickelte Kochherde; bessere Wärmedämmung; passive und aktive Solararchitektur; alternative Kühlflüssigkeiten, Wiederverwertung von fluorierten Gasen	Integrale Energiekonzepte für Geschäftsgebäude einschließlich Technologien wie z. B. intelligente Zähler, die Rückkopplung und Steuerung ermöglichen; in Gebäude integrierte Photovoltaik
Industrie	Effizientere elektrische Endverbraucherausrüstung; Wärme- und Stromrückgewinnung; Materialwiederverwertung und -ersatz; Emissionsminderung von Nicht-CO_2-Gasen; prozessspezifische Technologien	Weiterentwickelte Energieeffizienz; CCS bei Zement-, Ammoniak- und Eisenherstellung; reaktionsträge Elektroden für die Aluminiumherstellung
Landwirtschaft	Verbessertes Management von Acker- und Weideflächen zur Erhöhung der C-Speicherung; Renaturierung von degradierten Böden; verbesserte Reisanbautechniken sowie Vieh- und Düngemanagement (CH_4-Emissionen); verbesserte Stickstoffdüngung (N_2O-Emissionen); Energiepflanzen als Ersatz für fossile Brennstoffe; erhöhte Energieeffizienz	Technologische Verbesserungen zur Steigerung der Ernteerträge und Vermeidung von Ernteausfällen und somit reduzierter Flächenbedarf für Ackerflächen bzw. höheres Potential für Energiepflanzen
Forstwirtschaft	(Wieder-)Aufforstung; Forstwirtschaft; reduzierte Entwaldung; Regulierung von Holzprodukten; Nutzung von Forstprodukten für Bioenergie als Ersatz für fossile Brennstoffe	Weiterentwicklung von Baumarten zur Steigerung der Biomasseproduktivität und Kohlenstoff-Speicherung. Verbesserte Fernerkundung für die Analyse des Potenzials zur CO_2-Aufnahme durch Vegetation /Boden und für die Kartierung von Landnutzungsänderungen
Abfall	Rückgewinnung von Methan aus Deponien; Müllverbrennung mit Energierückgewinnung; Kompostierung organischer Abfälle; kontrollierte Abwasserbehandlung; Recycling und Abfallminimierung	Methanoxidationsschicht (Biocover) und Biofilter für optimierte CH_4-Oxidation

Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Figure SPM.3. Cambridge University Press

globalen Emissionen zwischen etwa 2010 und 2030 ein Maximum erreichen (IPCC, 2014). Die Szenarien des Global Energy Assessment (GEA, 2012) gehen von einem Maximum der Emissionen in der Dekade 2010 aus und erfordern teils netto „negative" Emissionen gegen Ende des Jahrhunderts, um eine Temperaturstabilisierung auf 2 °C zu erreichen. Das bedeutet, die derzeitige Entwicklung läuft in die falsche Richtung und führt zu einer Lücke zwischen vorherrschenden Trends (IPCC SRES A1FI Szenario) und notwendigen Reduktionen in 2 °C Szenarien, wenn nicht sofortige und weitreichende Emissionsminderungsmaßnahmen erfolgen.

Eine Veränderung der globalen Jahresdurchschnittstemperatur im Bereich von 5 °C und darüber, entspräche grob der Temperaturdifferenz während des Übergangs von Eiszeit und Zwischeneiszeit, welcher in geologischen Zeiträumen von statten geht (vgl. Band 1; IPCC, 2007f). Vieles deutet darauf hin, dass eine derartige Veränderung im Zeitraum von einem Jahrhundert kritische Kipp-Punkte des Klimasystems und anderer planetarer Prozesse auslösen kann (GEA, 2012; Rockström et al., 2009; World Bank, 2012). Eine um 5 °C erwärmte Erde wäre ein andersartiger Planet, etwa im Vergleich zu den letzten 11 700 Jahren (Pleistozän und Holozän),

die zum Hervorgehen der Zivilisationen geführt haben (vgl. Band 1, Kapitel 3).

Auch eine Erwärmung um 2 °C wäre mit signifikanten Veränderungen verbunden, stellt aber einen Schwellenwert dar, bei dem katastrophalere Folgen vermieden werden könnten (IPCC, WGII, AR4, 2007a; WBGU, 2011). Temperaturveränderungen über dem Festland sind signifikant höher und bedeuten nahezu eine Verdopplung des Anstiegs über polaren (IPCC, 2007f) und alpinen (vgl. Band 1, Kapitel 4) Regionen im Vergleich zur globalen Mitteltemperatur.

Entwicklungspfade zur Erreichung des 2 °C-Zieles

Die Internationale Energieagentur (IEA, 2012) schätzt, dass es aufgrund des Ausbaus an (Kohle-) Kraftwerkskapazitäten und der langen Investitionszyklen bereits im Jahr 2017 zu einem „Infrastruktur Lock-in" kommt. Die bis dahin geschaffene energieerzeugende oder verbrauchende Infrastruktur würde bereits die Gesamtmenge der zulässigen CO_2-Emissionen verursachen, so dass kein Spielraum für zusätzliche Kraftwerke, Fabriken oder sonstige Infrastruktur mehr bestünde, sofern diese nicht vollkommen CO_2-frei wären. Im Global Energy Assessment (GEA, 2012) konnte in mehreren Entwicklungspfaden gezeigt werden, dass eine Stabilisierung des durchschnittlichen globalen Temperaturanstiegs auf 2 °C möglich (vgl. Abb. 1.1) wäre und zusätzlich eine Reihe an normativen Zielen, von einem Ausbau der Energieversorgungssicherheit bis zur Vermeidung von Luftschadstoffen, erreicht werden könnten. Vermeidungsmaßnahmen schaffen dabei sowohl einen Zusatznutzen zur Erreichung anderer Ziele als auch einen geringeren Anpassungsdruck. Abbildung 1.2 zeigt einen dieser Entwicklungspfade, in diesem Fall mit dem Auslaufen von Kernenergie.

Das verbleibende zusätzliche kumulative Volumen zukünftiger Emissionen beläuft sich auf etwa 750 Gt CO_2-Äq. um eine Stabilisierung bei 2 °C zu erreichen (IPCC, 2007e). Für eine Stabilisierung bei 2 °C müssten die globalen Emissionen ihren Höchststand in der Dekade 2010 erreichen und danach zwischen 31–71 % bis zur Mitte des Jahrhunderts abnehmen (GEA, 2012). Je später die Emissionen ihren Höchststand erreichen, desto größer ist die Notwendigkeit, Emissionen nach diesem Zeitpunkt verstärkt zu reduzieren, da sich der durchschnittliche globale Temperaturanstieg näherungsweise proportional zu den kumulativen Emissionen verhält.

Ein Überschreiten dieses Niveaus impliziert, dass CO_2 aus der Atmosphäre entfernt werden muss („negative Emissionen"). Dieses sogenannte „Overshooting" könnte nur durch die Bindung von CO_2 kompensiert werden, beispielsweise durch Aufforstung oder Biomassenutzung in Verbindung mit CO_2-Abscheidung und -Speicherung (Carbon Capture and Storage, CCS) bzw. anderen bisher nicht erprobten Technologien.

Eine Kombination von Emissionsminderung und Anpassung ist unter jeglichem Szenario des globalen Temperaturanstiegs vonnöten, aber die Gewichtung der Maßnahmenbündel kann sich je nach Szenario verschieben. In jedem Fall ist sofortiges Handeln erforderlich, um einen Lock-in-Effekt bei vorherrschenden Trends zu verhindern und neuen techno-ökonomischen Systemen, institutionellen Gefügen und Verhaltensänderungen Zeit zur Verbreitung und Erprobung zu geben.

Erfordernisse und Potenziale von Emissionsminderung

Das Ausmaß, das verschiedene Technologien zur Emissionsminderung beitragen können, variiert je nach Region, Stabilisierungsniveau und dem jeweiligen Zeitfaktor. Insbesondere für eine Stabilisierung der THG-Konzentration auf 550 ppm und darunter, legen die Szenarien generell mehr Gewicht auf die Nutzung von kohlendioxidarmen Energiequellen, wie erneuerbaren Energien, Kernkraft oder die Nutzung von CO_2-Abscheidung und -Speicherung. In diesen Szenarien muss eine Verringerung der Kohlendioxidintensität der Energieversorgung und der gesamten Wirtschaft viel schneller von statten gehen als in der Vergangenheit.

Das ökonomische Minderungspotenzial ist preisabhängig und liegt zumeist über jenem des Marktgleichgewichtes (d. h. es kann nur über dem Marktpreis realisiert werden); es kann daher nur durch geeignete politische Maßnahmen, sowie durch den Abbau von Umsetzungsbarrieren erreicht werden (vgl. Abschnitt 1.4). Keine der in Tabelle 1.1 aufgelisteten Technologien wird in der Lage sein, das gesamte Minderungspotenzial in ihrem Sektor auszuschöpfen. Während Tabelle 1.1 entsprechend dem Vierten Sachstandsbericht des IPCC vor allem produktionsseitige und technologische Maßnahmen anführt, sind Maßnahmen zur Veränderung der Nachfrage und damit verbundene Verhaltensänderungen (Lebensstil) von mindestens ebenso großer Bedeutung für Minderungspotenziale, beispielsweise im Bereich Landwirtschaft durch veränderte Ernährungsgewohnheiten oder in der Endenergienachfrage (Smith et al., 2013; GEA, 2012).

Je niedriger die Stabilisierungsszenarien, desto größer wird in den kommenden Jahrzehnten der Bedarf an effizienteren Anstrengungen im Bereich der öffentlichen und privaten Forschung, Entwicklung und Demonstration (FE&D), bzw. an Investitionen in neue Technologien sowie damit einhergehen-

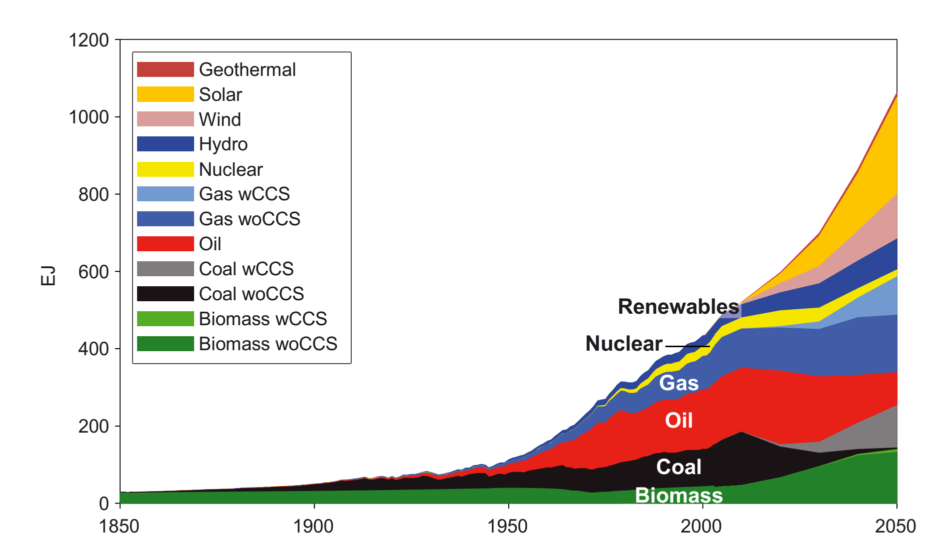


Abbildung 1.2 Entwicklung der Primärenergie in einem der GEA-Emissionsminderungspfade (mit dem Auslaufen von Kernenergie), der zu einer Stabilisierung der durchschnittlichen globalen Temperatur von 2 °C über vorindustriellem Niveau führt. Quelle: GEA (2012)

Figure 1.2 Development of primary energy in one of the GEA-mitigation pathways (with a nuclear phase-out) that leads to the stabilization of global mean temperature at 2 °C mean global temperature increase above the pre-industrial levels. Source: GEA (2012)

den Kostenreduktionen. Dies setzt voraus, dass Hemmnissen bei der Entwicklung, der Anschaffung, dem Einsatz und der Verbreitung von Technologien wirkungsvoll begegnet wird.

Kosten und Nutzen von Minderung

Die ökonomischen Kosten von niedrigen Stabilisierungsszenarien wurden unter anderem in den Modellvergleichsprojekten ADAM, EMF-22 und RECIPE untersucht. Niedrige Stabilisierungsszenarien sind solche, welche am ehesten geeignet sind, das 2 °C-Ziel zu erfüllen. In allen Modellrechnungen sind die Minderungskosten als % des globalen Bruttoinlandsprodukts (BIP) im einstelligen Prozentbereich angesiedelt (bei einer Wahrscheinlichkeit das 2 °C-Ziel mit 30 % zu überschreiten, reichen die Kostenschätzungen von 2 % bis –1 % des globalen BIP) (Knopf et al., 2011). Die niedrigen Kosten resultieren aus den in den Modellen getroffenen Annahmen hinsichtlich technologischer Flexibilität und globaler Beteiligung an der Emissionsminderung. Wird Marktversagen etwa in Form beschränkter Verfügbarkeit neuer Technologien oder unzureichender globaler Abdeckung der Klimapolitik berücksichtigt, so erhöhen sich die Kosten erheblich, was die Durchführbarkeit vom ökonomischen Standpunkt aus reduziert (Clarke et al., 2009; Edenhofer et al., 2009). Weiters hängt die Erreichbarkeit niedriger Stabilisierungsziele, neben der technologischen Flexibilität und der globalen Beteiligung, auch von der politischen und gesellschaftlichen Machbarkeit ab (vgl. Abschnitt 1.4). Beispielsweise kann der intensivierte Einsatz von Biotreibstoffen (vor allem jener der ersten Generation) zu Konflikten mit der Nahrungsmittelproduktion führen und erhöhte Anteile von CCS können mit erheblichen Sicherheitsrisiken verbunden sein.

1.1.2 Die europäische Perspektive bezüglich Emissionsminderung

Zentrale politische Minderungsziele auf europäischer Ebene

Die EU Staats- und RegierungschefInnen beschlossen auf dem Gipfeltreffen im März 2007 eine umfassende Herangehensweise an die Klima- und Energiepolitik, welche den Klimawandel bekämpfen, die Sicherheit der Energieversorgung erhöhen sowie die Konkurrenzfähigkeit Europas verstärken soll. Das Kernelement ist hierbei das Europäische Energie- und Klimapaket, das die drei Kernziele, nämlich: Reduktion der THG-Emissionen um 20 %, Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energiequellen am Endenergieverbrauch auf 20 % sowie Erhöhung der Energieeffizienz um 20 % („20-20-20-Ziel") definiert (EK, 2009c). Es setzt sich im Wesentlichen aus folgenden Bestandteilen zusammen (vgl. die grau hinterlegten Zeilen in Tabelle 1.2):

- Richtlinie über die Förderung erneuerbarer Energien (Renewable Energy Directive, RED).
- Richtlinie über die Verbesserung des Europäischen Emissionshandelssystems (ETS).
- Entscheidung über die Emissionsreduktion der Mitgliedstaaten betreffend ihre Emissionen in nicht vom ETS erfassten Sektoren (Effort Sharing Decision, ESD).
- Richtlinie zur Abtrennung und geologischen Speicherung von CO_2 (Directive on the Geological Storage of CO_2, CCS Directive).
- Richtlinie zur Qualität von Kraftstoffen (Fuel Quality Directive).

Tabelle 1.2 Wesentliche EU-Rechtsmaterien zur THG-Vermeidung; hervorgehoben: das am 23. April 2009 verabschiedete Klima- und Energiepaket

Table 1.2 Key EU legal documents on GHG mitigation; the climate and energy package (passed on April 23, 2009) is highlighted

Rechtsmaterien	Datum	Beschreibung
2001/77/EG	27. September 2001	Erneuerbaren Strom Richtlinie
2002/91/EG	16. Dezember 2002	Gebäuderichtlinie EPBD (erste Fassung)
2003/30/EG	8. Mai 2003	Biokraftstoff-Richtlinie (erste Fassung)
2003/87/EG	13. Oktober 2003	Emissionshandelsrichtlinie
2004/8/EG	11. Februar 2004	KWK-Richtlinie
2005/32/EG	6. Juli 2005	EcoDesign-Richtlinie (erste Fassung)
2006/32/EG	5. April 2006	Energieeffizienzrichtlinie
EG244/2009	18. März 2009	Beleuchtungsverordnung
2009/28/EG	23. April 2009	Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED)
2009/29/EG	23. April 2009	Neufassung der Emissionshandelsrichtlinie
2009/30/EG	23. April 2009	Biokraftstoff-Richtlinie
2009/31/EG	23. April 2009	CCS-Richtlinie
406/2009/EG	23. April 2009	Entscheidung zum Effort sharing (ESD)
EG443/2009	23. April 2009	Fahrzeugemissions-Verordnung
2009/125/EG	21. Oktober 2009	EcoDesign-Richtlinie (zweite Fassung)
2010/31/EU	19. Mai 2010	Gebäuderichtlinie EPBD (zweite Fassung)

- Verordnung zu CO_2-Emissionen von Neuwagen (Regulation on Vehicle Emission Performance Standards).

Das Klima- und Energiepaket wird darüber hinaus durch weitere, bereits vor dem Paket verabschiedete Maßnahmen (zum Europäischen Emissionshandel im Rahmen des ETS, die Energieeffizienzrichtlinie, die Ecodesign-Richtlinie, die Energy Performance of Buildings Directive – EPBD betreffend die Energieeffizienz von Gebäuden, die Richtlinie zur Kraft-Wärme-Kopplung – KWK) sowie durch Folgedirektiven ergänzt (Tabelle 1.2).

Diese Maßnahmen, die neben weiteren Zielen wie der Unterstützung des Binnenmarktes, die Verringerung der Importabhängigkeit oder die Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit auf eine Verringerung der THG-Emissionen abzielen, kombinieren unterschiedliche Politikinstrumente und -strategien. Sie umfassen im Wesentlichen:

- die Einführung des Handels mit Berechtigungen zur THG-Emission (EU-Emissionshandel, EU ETS);
- die Reglementierung von Energietechnologien und fossilen Energieträgern;
- die Verbesserung der Energieeffizienz durch die Vorgabe von Zielen;
- die Förderung von erneuerbaren Energiequellen;
- die Schaffung eines rechtlichen Rahmens für die geologische Speicherung von THG (Carbon Capture and Storage, CCS).

Die Einführung und Umsetzung einiger der genannten Maßnahmen (RED, ESD, EPBD) wird durch spezielle Begleitprogramme (Concerted Actions) unterstützt, die den Erfahrungsaustausch und die Harmonisierung zwischen den Mitgliedsländern unterstützen sollen.

Um gefährliche Klimaveränderungen zu verhindern und den durchschnittlichen Temperaturanstieg unter 2 °C zu halten (verglichen mit vorindustriellen Niveaus), bestätigte der Europarat im Februar 2011 das Vorhaben der EU, die THG-Emission bis 2050 um 80–95 % zu reduzieren (verglichen mit den Werten von 1990). Die Zehn-Jahres-Wachstumsstrategie der EU, auch „Europa 2020 Strategie für ein intelligentes, nachhaltiges und integratives Wachstum" genannt, unterstützt diese Zielsetzung. So konzentriert sich eines der fünf Hauptziele dieser Strategie auf den Klimawandel, bzw. Energie und bekräftigt somit die Ziele der „20-20-20"-Strategie. Die Europa 2020 Strategie, welche ein Rahmenprogramm zur verstärkten Zusammenarbeit zwischen EU und nationalen Behörden bildet, beinhaltet auch sieben Leitinitiativen von denen sich eine auf Ressourceneffizienz konzentriert und vom „Fahrplan für ein ressourcenschonendes Europa" (EK, 2011a) unterstützt wird.

Die derzeitigen Maßnahmen und Initiativen der EU beschränken sich im Allgemeinen auf Ziele und Rahmenbedingungen für den Zeitraum bis 2020. Um den Mitgliedstaaten einen Rahmen für die Entwicklung von Maßnahmen bis 2050 zu geben, hat die Europäische Kommission (EK) die Ausarbeitung einer Reihe von Fahrplänen (Roadmaps) in Auftrag gegeben, die unter Verwendung von quantitativen Szenarien erstellt wurden.

Der „Fahrplan für den Übergang zu einer wettbewerbsfähigen CO_2-armen Wirtschaft bis 2050" (EK, 2011b) entwirft erste mögliche Entwicklungspfade der europäischen Wirtschaft hin zu einer THG-Reduktion von 80 bis 95 %. Darauf aufbauend skizzieren der „Energiefahrplan 2050" (EK, 2011c) sowie das „Weißbuch Verkehr" (EK, 2011d) mögliche Wege zu einem konsistenten Energie- und Transportsektor. Dabei wird auch in diesen Sektoren eine massive Reduktion der THG-Emissionen angestrebt und zwar im Ausmaß zwischen 60 % (Transport) und 95 % (Energie).

Erfordernisse und Potenziale für Emissionsminderung auf europäischer Ebene

Die im vorigen Abschnitt angeführten Richtliniendokumente betonen, dass vor allem in den Sektoren Verkehr, Energie, Bau, Industrie und Landwirtschaft Potenziale zur Verminderung der Emissionen in Europa bestehen (Tabelle 1.3). Im Energiesektor (vgl. Band 3, Kapitel 3) besteht hierbei das größte Minderungspotential, gefolgt von Verkehr (vgl. Band 3, Kapitel 3) und Industrie (vgl. Band 3, Kapitel 5). Prognosen weisen darauf hin, dass im europäischen Verkehrssektor ein kurzfristiges Emissionsreduktionspotenzial signifikanten Ausmaßes besteht, welches jedoch über die Zeit aufgrund bereits erfolgter Einsparungsmaßnahmen abnimmt (Clapp et al., 2009). Nach Elektrizität und Verkehr folgt die Industrie als Sektor mit dem drittgrößten Emissionsreduktionspotential in Europa. Es ist jedoch eine Vielzahl an Maßnahmen erforderlich, um die verfügbaren Emissionsreduktionspotenzial zu realisieren, ohne gleichzeitig die Wettbewerbsfähigkeit zu beeinträchtigen. Laut dem Vierten Sachstandsbericht (IPCC, 2007c) bietet der Gebäudesektor (vgl. Band 3, Kapitel 5) das kostengünstigste Einsparungspotential in allen Regionen der Welt und somit auch in Europa. Die Bereiche Landwirtschaft und Bodennutzung (vgl. Band 3, Kapitel 2) spielen eine wichtige Rolle bei einer umfangreichen Minderungsstrategie, da beide Bereiche wesentliche Potenziale zur Senkung der THG-Emissionen aufweisen. Die verfügbaren Dokumente der Richtlinien der EU-Minderungsstrategien weisen jedoch auch auf einige Lücken hin, welche genauer betrachtet werden sollten:

- Stärkerer Fokus auf menschliches Verhalten (nachfrageseitige Maßnahmen).
- Stärkerer Fokus auf das Abfallmanagement und Recyclings.
- Stärkerer Fokus auf zugeschnittene Maßnahmen zur Einhaltung (Compliance), um Ländern die Umsetzung ihrer Ziele zu erleichtern.

Umsetzung der Instrumente und Maßnahmen

Im Folgenden wird ausschließlich auf die Umsetzung der klimapolitischen Instrumente und Maßnahmen eingegangen. Bzgl. der energiepolitischen Instrumente und Maßnahmen vgl. Band 3, Kapitel 3.

Europäischer Emissionshandel

Der Europäische Emissionshandel bzw. das European Emission Trading Scheme (ETS) (Richtlinien 2003/87/EG, 2009/29/EG) sieht vor, dass energieintensive Unternehmen CO_2 nur noch in der durch Emissionsberechtigungen gedeckten Menge ausstoßen dürfen. Die Zertifikate werden entsprechend den nationalen Minderungsverpflichtungen in Stufen verringert. Sie sind innerhalb der EU handelbar. Ziel des Emissionsrechtehandels ist die zielgenaue und zugleich kosteneffiziente Reduzierung der THG-Emissionen (van Asselt, 2010).[1] Die erste Handelsperiode umfasste die Jahre 2005 bis 2008, die zweite die Jahre 2008 bis 2012. EU-weit werden derzeit rund 10 000 Anlagen vom Emissionshandel erfasst, die ca. 46 % der CO_2-Emissionen in der EU verursachen. Für jede dieser Anlagen wird ein in absoluten Mengen (nicht relativ bezogen auf den Produktionsoutput) gemessenes Emissionsminderungsziel festgelegt. Diesem Ziel entsprechend erhielten die AnlagenbetreiberInnen am Anfang jedes Jahres eine bestimmte Menge an CO_2-Emissionsrechten (Zertifikaten) überwiegend gratis zugeteilt (Grandfathering).

Gelingt es weniger CO_2 auszustoßen, können die Zertifikate verkauft werden. Im umgekehrten Fall müssen Zertifikate von anderen Unternehmen zugekauft werden. Der Preis für die Zertifikate bildet sich auf einem Zertifikatsmarkt in Abhängigkeit von Angebot und Nachfrage. Würde ein

[1] In der ersten Phase des EU-Emissionshandelssystems waren folgende Sektoren betroffen: Strom- und Wärmeerzeugung mit fossilen Rohstoffen ab 20 Megawatt (MW), Mineralölraffinerien, Kokereien, Eisenmetallerzeugung und -verarbeitung, Anlagen für die Herstellung von Roheisen oder Stahl, Anlagen zur Herstellung von Zementklinker, Kalk, Glas einschließlich Glasfasern, keramischen Erzeugnissen, Zellstoff, Papier und Pappe.

Tabelle 1.3 Zentrale Emissionsminderungsmöglichkeiten auf europäischer Ebene. Quelle: nach Clapp et al. (2009)

Table 1.3 Key options for mitigation at the European level. Source: adapted from Clapp et al. (2009)

Sektor	Potenzial
Energie	• Kohlendioxidfreie Elektrizitätserzeugung: Laut Prognosen für 2050 wird der Strombedarf 36 % bis 39 % des ganzen Energiebedarfs in der EU ausmachen, weshalb ein Ausbau der kohlendioxidfreien Elektrizitätserzeugung zur Erreichung der Emissionsminderungsziele erforderlich ist. • Erneuerbare Energie: Prognosen zeigen die Notwendigkeit der Erhöhung des Anteils an erneuerbarer Energie im Energieträgermix auf, was ad-hoc Maßnahmen und neue Investitionen in die Entwicklung der bestehenden Produktions-, Effizienz- und Speichertechnologien erfordert. • Infrastruktur: Um die Steigerung von kohlendioxidarmer Energie zu unterstützen, müssen Netze und Konnektivität verbessert werden. Ein ganzheitliches Netzwerk zur Übertragung, Verteilung und Speicherung von Strom ist erforderlich, um lokale Energieressourcen mit zentralisierten Systemen zu verbinden. • Energieeffizienz: Energieeffizienzverbesserungen seitens der Industrie und Haushalte repräsentieren ein signifikantes Potenzial für Minderung. • Innovation: Der Bedarf an enormer Hochskalierung von kohlendioxidarmen Technologien erfordert größere Investitionen in die Erforschung und Entwicklung von technischen Innovationen (z. B. Technologien wie CCS). • Private Investitionen: Signifikante Investitionen sind wichtig um den EU-Energiesektor auf einen nachhaltigen Weg zu führen. In diesem Zusammenhang ist der der private Sektor essenziell. Es besteht der Bedarf an staatlichen Finanzierungen, um das Interesse von privaten InvestorInnen an kohlendioxidarmen Initiativen zu erwecken, sodass mit grünen Technologien verbundene Investmentrisiken reduziert werden.
Verkehr	• Effizienzverbesserungen: Fahrzeugeffizienz benötigt Verbesserungen durch neue Motoren, Material, Design und umweltfreundlichen Energieverbrauch. Des Weiteren ist eine höhere Treibstoffeffizienz nötig. • Integration: Um die europaweite Leistungsfähigkeit zu verbessern, ist ein allgemeines europäisches Transportsystem für Straßengüter-, Bahn-, Luft-, Schiff- und Landverkehr notwendig. • Innovation: Es werden Forschungen im Bereich der europäischen Transport- und Innovationsrichtlinien benötigt. • Fördergelder: Um das Verhalten zu ändern, ist eine korrekte Gebührenverrechnung im Bereich der Infrastruktur, den Netzwerken und Treibstoffen erforderlich, basierend auf dem Prinzip des „Polluter Pays" und „User Pays" Prinzips. • Finanzierung: Die Durchführung der europaweiten Strategie verlangt Investitionen. Besonders notwendig ist die Verbesserung des Zugangs zur Finanzierung von großen Infrastrukturprojekten mittels neuer finanzieller Instrumente.
Industrie	• Ressourcen- und Energieeffizienz: Es besteht ein Bedarf an fortschrittlicheren, ressourcen- und energieeffizienteren Prozessen der Industrie und der Ausstattungen, sowie vermehrtes Recycling. • Innovationen: Um die Transition hin zu leistungsfähigeren Prozessen und Technologien, einschließlich Minderungstechnologien für kohlendioxidfreie Emission zu unterstützen, wird mehr Gewichtung auf F&E benötigt. • Investitionen: Um sich in Richtung einer konkurrenzfähigen kohlendioxidarmen Wirtschaft zu bewegen, sind signifikante Investitionen sowohl von öffentlicher als auch von privater Seite notwendig.
Gebäude	• Null-Energie Gebäude: Die EU-Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden schreibt vor, dass neue Gebäude ab 2021 Null-Energie Gebäude sein müssen. Dies ist eine massive Veränderung der gegenwärtigen Gewohnheiten und verlangt spezifische Fördergelder des öffentlichen Sektors. • Finanzierung: Auf Grund der unterschiedlichen Barrieren bei der Finanzierung der Energieeffizienz ist eine spezifische Unterstützung erforderlich, um die Hindernisse der Investitionskosten zu überwinden.
Landwirtschaft und Bodennutzung	• Ressourcenproduktivität: Es besteht Bedarf an nachhaltiger, leistungsfähiger und verbesserter Ertragsfähigkeit von Land und Viehbestand. Dies kann jedoch auch durch effizientere Düngemittel verbessert werden. • Unterstützungsmaßnahmen: Bio-Vergasung von organischem Abfall, besseres Futter und lokale Vermarktung der Produktion kann in Zukunft die Effizienz dieses Sektors weiter verbessern. Die gesetzliche Verankerung der „Gemeinsamen Agrarpolitik" wird für 2013 erwartet, genauso wie die Mitteilung „Innovation für nachhaltiges Wachstum: eine Bioökonomie für Europa". Erwartet wird von all diesen Entscheidungen, dass sie die Vorstellungen von LULUCF (Land Use, Land Use Change and Forestry) widerspiegeln.

Unternehmen das vorgegebene Limit an Emissionsrechten überschreiten, müsste es bis Ende 2007 pro Tonne CO_2 40 Euro Strafe zahlen und ab 2008 100 €/t. Zu Strafzahlungen ist es jedoch bislang nicht gekommen, da von Beginn an zu viele Zertifikate am Markt waren, die Finanzkrise durch sinkende Emissionen zu einem weiteren Überschuss an Zertifikaten beitrug und somit der Preis für Zertifikate weit unter jenen der Sätze für Strafzahlungen gefallen ist. Aufgrund des starken Preisverfalls der Zertifikate konnte das Instrument bislang kaum Lenkungswirkung entfalten (Skjærseth und Wettestad, 2008).

Dies könnte sich aufgrund einer weitreichenden Reform des ETS-Systems beginnend mit der dritten Handelsperiode (2008 bis 2013) in den kommenden Jahren ändern (van Asselt, 2010). In den ersten beiden Handelsperioden wurden die Reduktionsziele für die betroffen Firmen sowie die Zuteilung der Zertifikate von den EU Mitgliedstaaten bestimmt, was zu Überzuteilungen führte. Für die dritte Periode wurde ein EU-

weites Reduktionsziel festgelegt, wobei der Energiesektor alle Zertifikate ersteigern muss, die Industrie je nach Gefahr einer möglichen Abwanderung von Firmen aus der EU (Carbon Leakage) nur einen Teil. Sofern das derzeitige Reduktionziel für die ETS Sektoren von –21 % bis 2020 jedoch nicht erhöht wird, kann mit keinen steigenden CO_2-Preisen gerechnet werden, da die überschüssigen Zertifikate aus der zweiten Periode in die dritte Periode übertragen werden können, und die Wirtschaftskrise zu einer spürbaren Minderung der Emissionen führte.

Wirksamkeit der Maßnahmen

Die Wirksamkeit der Maßnahmen auf EU-Ebene, welche die Reduzierung der CO_2-Emissionen zum (Teil-)Ziel haben, ist unterschiedlich und nur zum Teil direkt effektiv.

Nur die Kombination des ETS mit der Effort-Sharing-Entscheidung stellt sicher, dass auf nationaler Ebene die durch den Emissionshandel erzielten Reduktionen von CO_2-Emissionen in den ETS-Sektoren nicht durch Zunahmen in Nicht-ETS-Sektoren konterkariert werden können. Auf globaler Ebene verbleiben jedoch selbst hier Schlupflöcher in Form der Abwanderung von CO_2-emittierenden Betriebsstätten (Carbon Leakage, vgl. Abschnitt 1.4) und des Importes von Produkten mit einem großen CO_2-Fußabdruck anstelle deren Produktion im EU-Inland („graue Importe"). Aufgrund der internationalen Spezialisierung im Handel sind die Importe der Industrieländer deutlich CO_2-haltiger als deren Exporte, da diese zu erheblichen Teilen aus Schwellenländern mit geringen Klimaschutzvorgaben stammen. Da jedem Land nur jene Emissionen zugerechnet werden, die bei der Produktion im Inland entstehen, sind die Emissionen die mit der Güternachfrage im Inland verbunden sind, in den meisten Industrieländern deutlich höher als die durch die Produktion entstehenden (vgl. Band 3, Kapitel 5; Jakob und Marschinski, 2012). Die RED betrifft auf der einen Seite nur einen – wenngleich wichtigen – Sektor des Energiesystems, und wirkt nur solange emissionsreduzierend, solange das gesamte Wachstum der Strom- und Wärmeaufbringung hinter dem Ausbau der erneuerbaren Energieträger zurückbleibt, und im ETS-Sektor die Emissionsreduktionsziele erreicht werden. Ähnliches gilt für die ESD; hier ist die Emissionsreduktion abhängig vom Wirtschaftswachstum sowie von der Entwicklung der Anteile erneuerbarer und fossiler Energieträger am Bruttoinlandsverbrauch.

Die übrigen Richtlinien und Verordnungen zielen auf die Harmonisierung und Reglementierung von Technologien, wie etwa die CO_2-Abscheidung, Fahrzeuge oder Gebäude.

Kosten und Nutzen der Umsetzung der „20-20-20"-Ziele

Die Umsetzung der Ziele durch jene Maßnahmen, welche in den Richtlinien vorgeschlagen werden, benötigt jährlich massive öffentliche und private Investitionen, über die nächsten 40 Jahre[2] hinweg durchschnittlich 270 Mrd. € pro Jahr (EK, 2011e). Diese zusätzlichen Investitionen entsprechen 1,5 % des EU-BIPs, wobei gegenwärtige Investitionen bei 19 % des BIPs (2009) liegen (EK, 2011e).

Investitionen im Energiesektor könnten zwischen 1,5 Billionen € und 2,2 Billionen € für den Zeitraum 2011 bis 2050 liegen. In einem Szenario, in dem die gegenwärtigen Richtlinieninitiativen für die Zukunft unterstellt werden, würden die Kosten für das gesamte Energiesystem weniger als 14,6 % des EU-BIPs im Jahr 2050 betragen, verglichen mit 10,6 % des BIPs im Jahr 2005. Diese Kosten werden jedoch bei weiteren Verzögerungen zunehmen (EK, 2011e).

Um die Ziele der Emissionsreduktion erreichen zu können werden die Kosten für die infrastrukturelle Entwicklung des europäischen Transportsektors auf über 1,5 Billionen € im Zeitraum zwischen 2010 und 2030 geschätzt, mit einer zusätzlichen Billion für Investitionen in Fahrzeuge, Ausstattungen und Ladeinfrastruktur (EK, 2011e).

Die Investitionen in energiesparende Komponenten im Gebäudesektor werden im nächsten Jahrzehnt auf 200 Mrd. € erhöht werden müssen (EK, 2011e).

Die Investitionen würden sich jedoch auch in einem höheren Wachstum, steigender Beschäftigung, verbesserter Gesundheit, besserer Luftqualität, größerer Energiesicherheit (selbst wenn die Strompreise bis 2030 erhöht werden) und niedrigeren Treibstoffkosten, niederschlagen. Über einen Zeitraum von 40 Jahren wird erwartet, dass die verbesserte Energieeffizienz verbunden mit in der Union produzierter kohlendioxidarmer Energie den EU-Durchschnitt der Kosten für Treibstoff zwischen 175 Mrd. € und 320 Mrd. € pro Jahr reduziert, vorausgesetzt eines Anstiegs der Kosten von importierten Öl und Gas auf 400 Mrd. € jährlich bis 2050. Darüber hinaus könnten 10 Mrd. € an jährlichen Ausgaben gespart werden, welche momentan für die Kontrolle von Luftverschmutzung verwendet werden und die bis zum Jahr 2050 auf 50 Mrd. €/Jahr steigen würden (EK, 2011e).

Betreffend der „20-20-20"-Ziele scheint die EU am richtigen Weg zu sein, 20 % der THG-Emissionen zu reduzieren und einen Anteil von 20 % erneuerbaren Energien in den

[2] Das Finanzierungsausmaß dieser Projekte würde eine Finanzierung durch die Europa 2020 Project Bond Initiative nahelegen.

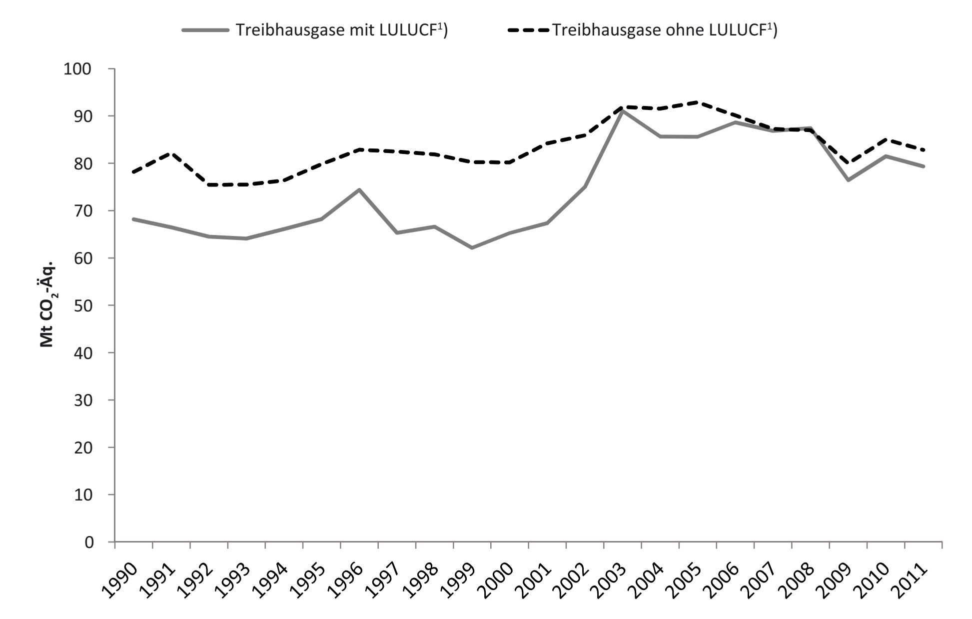


Abbildung 1.3 Entwicklung der österreichischen THG-Emissionen in Mt CO_2-Äq. mit und ohne Effekt von Landnutzungsänderungen. Quelle: Anderl et al. (2012a). LULUCF: Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft

Figure 1.3 Development of Austrian GHG emissions in Mt CO_2-eq. with and without effects from land use, land use change and forestry (LULUCF). Source: Anderl et al. (2012a)

Energieträgermix einzubringen, vorausgesetzt die gegenwärtigen Richtlinien werden vollständig umgesetzt. Fortschritte bezüglich der Steigerung der Energieeffizienz um 20 % zeigen sich eher langsam, weshalb verstärkte Bemühungen benötigt werden, um dieses Ziel zu erreichen. Mit Blick auf die anspruchsvollen 2050 Ziele müssen signifikante Veränderungen in der Art und Weise, wie produziert und konsumiert wird, stattfinden. Ebenso werden umfassende Investitionen zur Unterstützung dieses Wandels benötigt. Die Rolle des öffentlichen Sektors ist in diesem Zusammenhang sehr essenziell, um zusätzlich private Investitionen zu mobilisieren.

1.1.3 Die österreichische Perspektive bezüglich Emissionsminderung

Ausgangssituation und Reduktionsziele

Die Entwicklung der THG-Emissionen in Österreich seit 1990 zeigte bis zum Jahr 2005 eine kontinuierliche Zunahme und erreichte mit 92,9 Mt CO_2-Äq. im Jahr 2005 einen Höchstwert (Anderl et al., 2012b). In Abbildung 1.3 ist die Entwicklung der THG-Emissionen seit dem Basisjahr 1990 mit und ohne Landnutzungseffekten dargestellt. Aus Landnutzungsänderungen und Senken ergibt sich ein emissionsreduzierender Effekt auf die österreichische THG-Bilanz.

Die heimische THG-Bilanz ist wesentlich vom Ausstoß an CO_2-Emissionen bestimmt, welche einen Anteil von etwa 85 % an den gesamten österreichischen THG-Emissionen ausmachen. Seit 2005 ist ein abnehmender Trend der THG-Emissionen beobachtbar, mit einer besonders starken Abnahme im Jahr 2009, die im Wesentlichen durch den starken Einbruch der wirtschaftlichen Aktivität infolge der Finanzkrise verursacht wurde. Dass dieser Rückgang der THG-Emissionen nur von transitorischer Natur war und ihr Ausmaß weiterhin stark an die wirtschaftliche Entwicklung gekoppelt ist, zeigt sich in der Folge im neuerlichen Anstieg der THG-Emissionen im Zuge der wirtschaftlichen Erholung im Jahr 2010.

Gliedert man die österreichischen THG-Bilanz 2010 (Anderl et al., 2012b) nach verursachenden Sektoren (Abbildung 1.4) wird die herausragende Bedeutung der Sektoren Industrie und produzierendes Gewerbe, Verkehr, Energieaufbringung sowie Raumwärme und Kleinverbrauch deutlich. Die genannten fünf Sektoren sind für etwa 85 % der österreichischen THG-Emissionen verantwortlich.

Seit 1990 hat es zum Teil gegenläufige Emissionsentwicklungen nach Sektoren gegeben (Abbildung 1.5). Die größten Zuwächse zeigt der Sektor Verkehr, wobei sich hier auch der Treibstoffexport niederschlägt. Das Ausmaß des Treibstoffexports kann zu einem wesentlichen Teil durch Treibstoffpreisdifferenzen zwischen Österreich und seinen Nachbarländern erklärt werden. Über das Ausmaß der Kraftstoffexporte liegen Schätzungen vor, die jedoch mit beträchtlichen Unsicherheiten behaftet sind. Der in den Berichten des Umweltbundesamtes genannte Anteil von bis zu 30 % ist daher unter diesem Aspekt zu interpretieren.

Ebenso wie der Verkehr, weisen auch die Emissionen aus der Industrie und dem produzierenden Gewerbe Zuwächse auf, das gleiche gilt für die Energieaufbringung. In beiden Bereichen spiegeln sich darin vor allem Produktions- und Out-

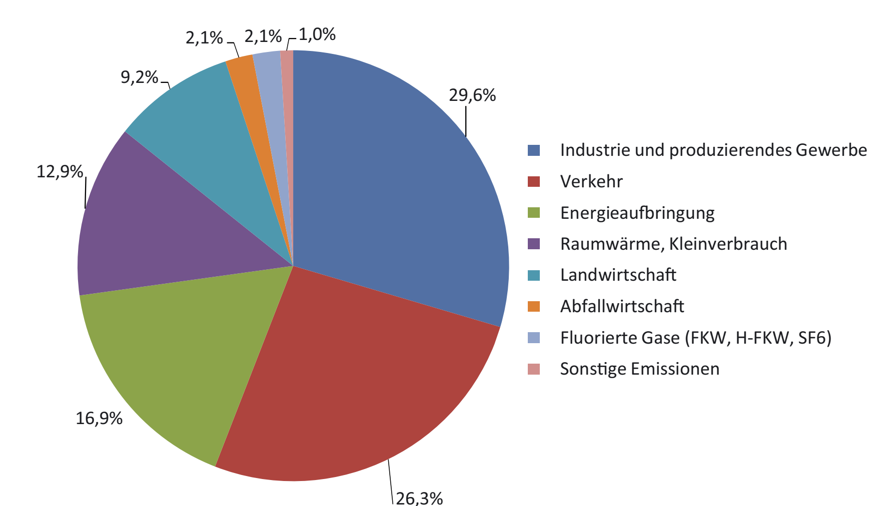


Abbildung 1.4 Sektorale THG-Emissionsanteile Österreich 2010 in Prozent. Quelle: Anderl et al. (2012a)

Figure 1.4 Sectoral share of GHG emissions in Austria 2010 in percent. Source: Anderl et al. (2012a)

put-Zuwächse wider. Emissionen einzelner Jahre im Bereich Raumwärme und Kleinverbrauch werden stark von witterungsbedingten Schwankungen beeinflusst, im Trend zeigen sich jedoch abnehmende Emissionen (Anderl et al., 2012a). Dieser Trend wird einerseits durch Verbesserungen in der thermischen Qualität von Gebäuden sowie den Einsatz emissionsärmerer Brennstoffe für die Bereitstellung von Raumwärme beeinflusst, andererseits gibt es auch durch eine zunehmende Fernwärmeversorgung Verschiebungen zum Sektor Energiebereitstellung.

Die Emissionen aus den Kategorien Sonstige Emissionen und Fluorierte Gase bleiben im Wesentlichen konstant. Die in der Klimastrategie (BMLFUW, 2002, 2007b) festgelegten indikativen Ziele für Emissionsreduktionen werden 2010 nur vom Sektor Raumwärme und sonstiger Kleinverbrauch erreicht (Anderl et al., 2012a). Allerdings ist darauf hinzuweisen, dass die in der Klimastrategie genannten sektoralen Emissionsziele keinen rechtlich verbindlichen Charakter aufweisen.

Bis 2012 galten für Österreich die Reduktionsziele der 1. Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls und das im EU „Burden Sharing Agreement" festgeschriebene österreichische Emissionsziel einer Reduktion der THG-Emissionen um 13 % gegenüber dem Basisjahr 1990. Bereits die Emissionsentwicklung in den ersten drei Jahren der Kyoto-Verpflichtungsperiode zeigte, dass Österreich dieses Ziel nicht durch heimische Emissionsreduktionen erreichen würde (vgl. Abbildung 1.6).

Im Vergleich der EU-Mitgliedsländer weist Österreich in den ersten drei Jahren der Kyoto-Verpflichtungsperiode eine besonders ausgeprägte Zielabweichung auf (vgl. Abbil-

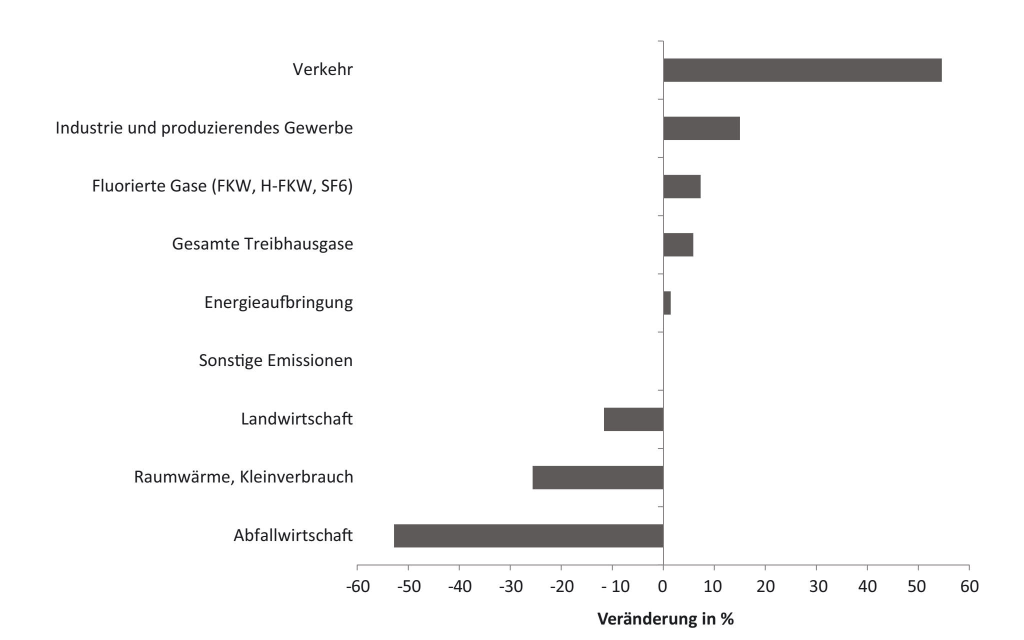


Abbildung 1.5 Veränderung der sektoralen THG-Emissionen 1990–2010 in Prozent. Quelle: Anderl et al. (2012a)

Figure 1.5 Change in sectoral GHG emissions 1990–2010 in percent. Source: Anderl et al. (2012a)

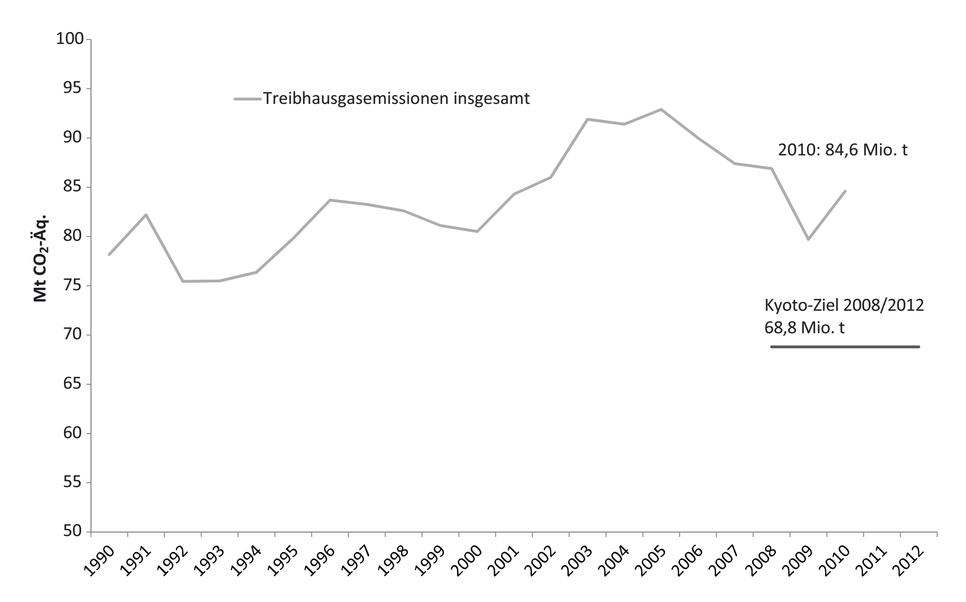


Abbildung 1.6 Entwicklung der THG-Emissionen und Kyoto-Ziel in Mt CO_2-Äq. Quelle: Anderl et al. (2012a)

Figure 1.6 Development of GHG emissions and Kyoto target in Mt CO_2-eq. Source: Anderl et al. (2012a)

dung 1.7). Box 1.2 vergleicht die Entwicklung der THG-Emissionen von 1990 bis 2012 für alle EU-Mitgliedsländer (EU-28) mit der Emissionsentwicklung in Österreich. Dieser Vergleich zeigt, welchen Einfluss Energieintensität, Emissionsintensität und wirtschaftliche Intensität auf die Entwicklung der Gesamtemissionen hatten. Während in der EU-28 Verbesserungen in Energie- und Emissionsintensität Zunahmen in der wirtschaftlichen Aktivität überkompensieren konnten sodass die Gesamtemissionen im Zeitraum 1990 bis 2012 sanken, war dies in Österreich nicht der Fall.

Für die mittlere Frist bis 2020 ist das Reduktionsziel aus dem EU-Energie- und Klimapaket (EK, 2008) sowie die Entscheidung über die Anstrengungen der Mitgliedstaaten zur Reduktion ihrer THG-Emissionen (Entscheidung 406/2009/EG) für Österreich relevant. Dieses Ziel lautet für die im ETS erfassten Anlagen eine EU-weite THG-Reduktion von 21 % bis zum Jahr 2020 im Vergleich zu den Emissionen dieses Sektors im Jahr 2005. Für die Sektoren, die nicht dem Emissionshandel unterliegen (im Wesentlichen die Sektoren Raumwärme, Verkehr, Landwirtschaft) sieht das EU-Energie- und Klimapaket

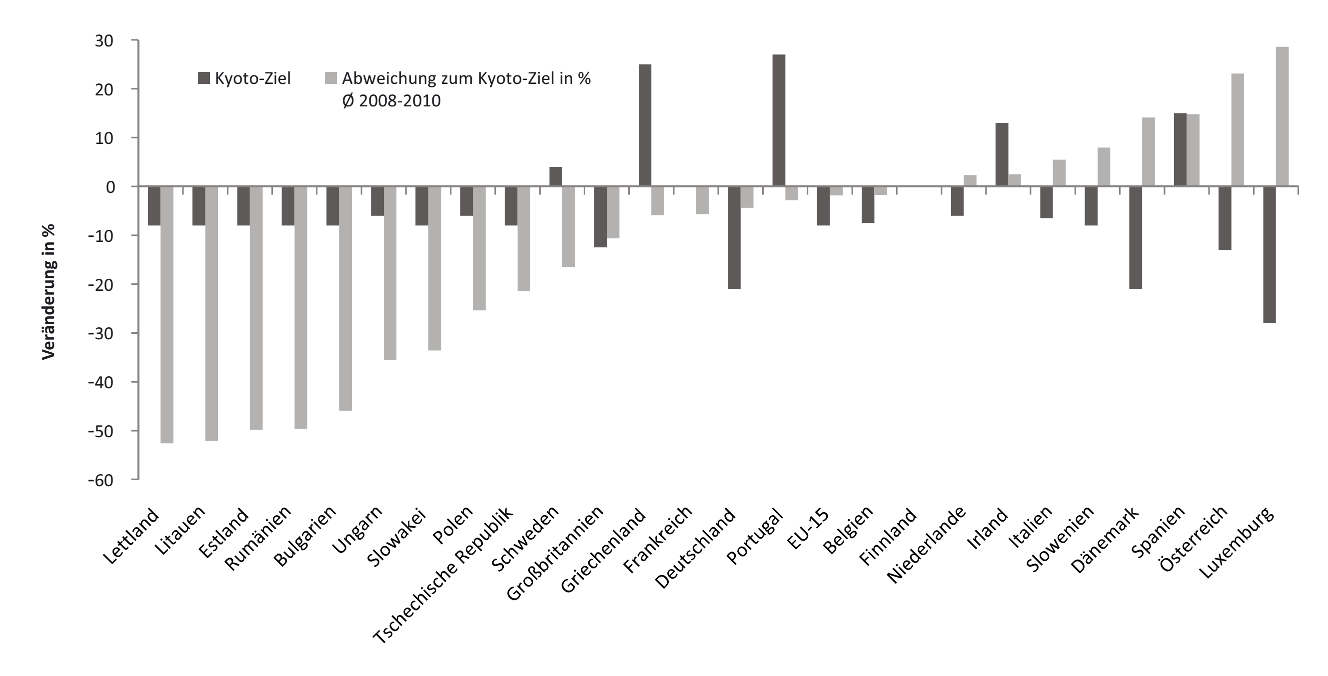


Abbildung 1.7 Kyoto-Zielabweichung in Prozent. WIFO-Berechnungen basierend auf EEA (2012)

Figure 1.7 Deviation from Kyoto target in percentage. Calculations by WIFO based on EEA (2012)

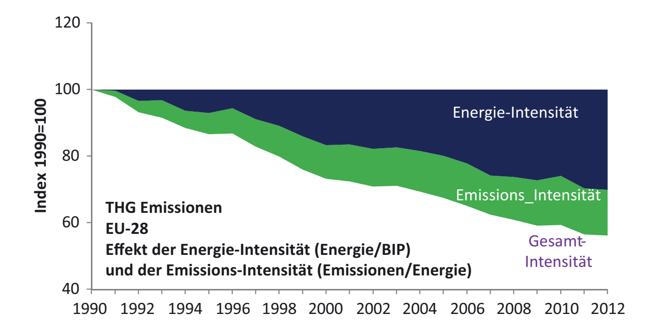
Box 1.2: Die Entwicklung österreichischer und europäischer THG-Emissionen im Vergleich (Quelle: Schleicher, 2014)

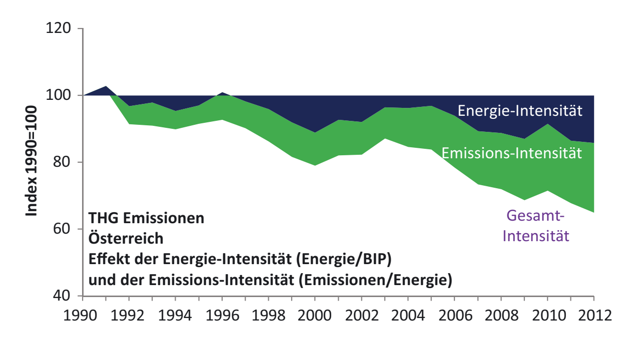
Box 1.2: Development of greenhouse gas emissions in Austria and Europe: a comparison (Source: Schleicher, 2014)

Die Entwicklung der THG-Emissionen lässt sich in drei Komponenten zerlegen, die fundamentale Eigenschaften des Energiesystems und der Wirtschaft beschreiben:

- Die Energieintensität des BIP erfasst den Energieverbrauch pro Euro des BIPs und ist somit ein Indikator für Energieeffizienz.
- Die Emissionsintensität der Energie macht sichtbar, wieviel THG-Emissionen pro Energieeinheit anfallen und reflektiert somit den Anteil von erneuerbaren Energien im Energiemix.
- Die wirtschaftliche Aktivität, ausgedrückt durch das BIP, generiert zusätzlich THG in Abhängigkeit von der Energie- und Emissionsintensität.

Abbildung 1 zeigt in einem Vergleich von 1990 bis 2012 für die 28 Mitgliedstaaten der EU (EU-28) und für Österreich die reduzierende Wirkung von Energie- und Emissionsintensität auf die THG-Emissionen. Beide Einflüsse ergeben die Gesamtintensität der Emissionen pro Euro BIP. Diese ist für die EU-28 deutlich höher als für Österreich. Auch die Zusammensetzung dieses Gesamteffektes ist aufschlussreich, denn im Gegensatz zur Dynamik bei den EU-28 dominiert in Österreich die Expansion der erneuerbaren Energien gegenüber der Energieeffizienz. Auch wenn bei den EU-28 der Effekt der Integration der neuen Bundesländer in Deutschland und in einzelnen Mitgliedstaaten die Verlagerung von energieintensiven Industrien zu berücksichtigen sind, wird für Österreich doch ein Aufholbedarf bei der Energieeffizienz sichtbar.

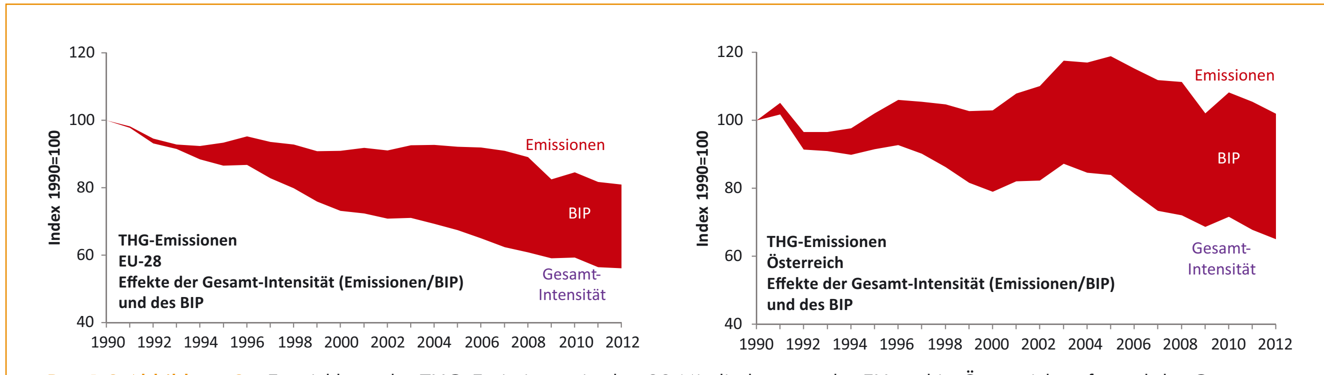




Box 1.2 Abbildung 1 Entwicklung der Energie- und Emissionsintensitäten in den 28 Mitgliedstaaten der EU und in Österreich. Quelle: Schleicher (2014), basierend auf Eurostat

Box 1.2 Figure 1 Development of energy amd emission intensity in the 28 member states of the EU and in Austria. Source: Schleicher (2014), based on Eurostat

Für den tatsächlichen Verlauf der Emissionen sind die reduzierenden Effekte auf die THG-Emissionen noch um die expandierenden Effekte des BIP zu ergänzen. Dies wird in Abbildung 2 sichtbar. Demnach hat sich für die EU-28 von 1990 bis 2012 die Gesamtintensität der THG-Emissionen um 44 % verringert, nämlich um 30 %-Punkte durch die Energieintensität des BIP und um 14 %-Punkte durch die Emissionsintensität der Energie. Durch den expandierenden BIP-Effekt von 25 % ergibt sich eine insgesamte Reduktion der THG-Emissionen bis 2012 um 19 %. Für Österreich beträgt die Verringerung der Gesamtintensität der THG-Emissionen 35 %, wozu mit 14 %-Punkten die Energieintensität und mit 21 %-Punkten die Emissionsintensität beitragen. Der für Österreich besonders hohe BIP-Effekt von 37 % führt zu einem Niveau der THG-Emissionen, das insgesamt 2 % über den Werten von 1990 liegt. In Abbildung 2 wird auch sichtbar, dass die EU-28 das für 2020 vorgesehene Reduktionsziel für THG praktisch schon jetzt erreicht haben. Deutlich ist erkennbar, dass es die nach 2008 einsetzende Wirtschaftskrise ist, die in hohem Ausmaß dafür verantwortlich zu machen ist.



Box 1.2 Abbildung 2 Entwicklung der THG-Emissionen in den 28 Mitgliedstaaten der EU und in Österreich aufgrund der Gesamtintensität der Emissionen und des BIP. Quelle: Schleicher (2014), basierend auf Eurostat

Box 1.2 Figure 2 Development of greenhouse gase emissions due to total intensity of emissions and of GDP, in the 28 member states of the EU and in Austria. Source: Schleicher (2014, based on Eurostat)

eine Reduktion der österreichischen THG-Emissionen von 16 % bis 2020 gegenüber den Emissionen des Jahres 2005 vor, wobei 2005 durch besonders hohe THG-Emissionen gekennzeichnet war. Nach Berechnungen des Umweltbundesamtes liegt der Zielwert für 2020 für diese Sektoren bei 47,7 Mt CO_2-Äq. (Anderl et al., 2012a).[3] Das Reduktionserfordernis für die Periode 2013 bis 2020 in absoluten Größen hängt neben der Effektivität der Klimapolitik und der jeweiligen Reduktionsmaßnahmen zusätzlich – wie bereits in der Vergangenheit – von der wirtschaftlichen Entwicklung in diesem Zeitraum ab.

Für den Zeitraum bis 2050 hat die EU-Kommission ihre Vorstellungen zu einer Reduktion der THG-Emissionen um 80–95 % im EU-Fahrplan für den Übergang zu einer wettbewerbsfähigen CO_2-armen Wirtschaft bis 2050 (EK, 2011b) dargelegt. Was dies für Österreich konkret bedeutet, ist aufgrund fehlender länderspezifischer Zielvorgaben noch nicht quantifizierbar.

Emissionsminderungspotenziale in Österreich

Für Österreich gibt es kaum umfassende wissenschaftliche Studien, die eine Abschätzung der Kosten und des Investitionsbedarfs von gesamtwirtschaftlichen Emissionsminderungsstrategien durchgeführt haben. Technische Potenziale zur Emissionsminderung wurden hingegen etwas ausführlicher analysiert (Müller et al., 2012; WIFO et al., 2012).

[3] Laut Entscheidung 406/2009/EG dürfen die Emissionen der nicht im Emissionshandel erfassten Sektoren im Jahr 2013 nicht höher als der Durchschnitt der Emissionen der Periode 2008–2012 sein. Wie hoch dieser Wert ist, wird nach Überprüfung der Emissionsbilanzen von der Europäischen Kommission festgelegt. Ausgehend von diesem Wert wird der Reduktionspfad bis 2020 durch lineare Interpolation berechnet.

In Österreich sind ca. zwei Drittel der THG-Emissionen durch den Verbrauch fossiler Energieträger bestimmt. Um nachhaltige emissionsarme Strukturen zu schaffen, sind daher grundlegende Veränderungen im Energiesystem erforderlich. Herkömmliche Analysen des Energiesystems fokussieren hauptsächlich auf die Bereitstellung von Primärenergie und die Energieumwandlung. Durch eine solche Perspektive werden jedoch technologische Potenziale auf anderen, vorgelagerten, Ebenen des Energiesystems nicht sichtbar. Ein umfassenderes Verständnis des Energiesystems ist daher unverzichtbar, da nicht die Nachfrage nach Energieflüssen sondern jene nach Energiedienstleistungen (z. B. Raumtemperatur) wohlstandsrelevant sind (vgl. auch Band 3, Kapitel 3, wobei jedoch in der Betrachtung des Energiesystems die Energiedienstleistungen am Ende der Energiekette stehen). Energiedienstleistungen stellen auch den Ausgangspunkt im Projekt EnergyTransition (Köppl et al., 2011) dar. In diesem Projekt werden konkrete technologische Optionen für Emissionsreduktionspotenziale quantifiziert, die für die Realisierung dieser Reduktionspotenziale notwendigen Instrumente werden allerdings nicht dargestellt. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass eine Realisierung der Emissionsminderungseffekte nicht durch ein einzelnes Instrument, sondern nur durch ein Bündel an Instrumenten erreicht werden kann. An Instrumenten stehen dabei Maßnahmen des öffentlichen Sektors (z. B. Steuern, Förderungen, F&E-Ausgaben, oder ordnungsrechtliche Maßnahmen wie Standards) zur Verfügung, die durch strukturelle Innovationen, sowie Beratung, Information oder Monitoring ergänzt werden sollten.

Geht man bei der Analyse des Energiesystems von den Energiedienstleistungen aus, leiten sich drei Fragestellungen für eine Reduktion des Energieverbrauchs und der CO_2-Emissionen ab (vgl. Köppl et al., 2011; Köppl et al., 2012):

- Was beeinflusst die Nachfrage nach Energiedienstleistung?
- Wo gibt es Potenziale für Produktivitätssteigerung (Effizienzsteigerung)?
- Wo gibt es Potenziale für Veränderungen im Energieträgermix?

Vom Blickwinkel der Energiedienstleistungen sind drei Bereiche von zentraler Bedeutung: Mobilität, Gebäude und Industrie. Für diese Bereiche können die Energiedienstleistungen mit einer großen Bandbreite an Technologien bereitgestellt werden. EnergyTransition entwickelte und quantifizierte in einem interdisziplinären Bottom-up-Ansatz Storylines für technologische Optionen, die geeignet sind, die österreichischen CO_2-Emissionen bis 2020 deutlich zu reduzieren. Um die Ziele gemäß dem EU Energie- und Klimapaket bis 2020 zu erreichen, wird von einem Reduktionserfordernis von 14 Mt CO_2-Äq. gegenüber einer Referenzentwicklung ausgegangen. Die analysierten nachfrageseitigen Technologieoptionen werden um technologische Reduktionsmöglichkeiten im Bereich der Bereitstellung von Elektrizität und Wärme ergänzt. Für die Bereiche Gebäude und Mobilität wird die Rolle von innovativen Werkstoffen berücksichtigt. Der gemeinsame methodologische Zugang bei der Berechnung der Reduktionspotenziale für alle Bereiche resultiert in einem Katalog technologischer Optionen (vgl. Tabelle 1.A1 im Anhang), die miteinander kombiniert werden können. Die umfassende Abbildung des gesamten Energiesystems und des entsprechenden Investitionsbedarfs wurde von Köppl et al. (2011) erstmals für Österreich durchgeführt. Auf regionaler Ebene findet dieser Ansatz Anwendung in Wolkinger et al. (2012).

Eine Abschätzung des Reduktionserfordernisses für Österreich bis 2020 zeigte, dass ein umfangreiches Maßnahmenbündel und dessen Implementierung notwendig sind, um die nationalen Emissionsziele zu erreichen. Nicht nur eine Fülle an Maßnahmen ist erforderlich, sondern auch ihre unmittelbare Implementierung. Zu den Emissionsminderungsoptionen gehören im Bereich Mobilität effiziente Raumstrukturen oder alternative Antriebe, im Bereich Gebäude zum Beispiel die Umsetzung eines Passivhausstandards, im Bereich Produktion zum Beispiel Prozessintensivierung oder Biomasse für Prozesswärme, schließlich im Bereich Elektrizität und Wärme Windenergie oder Nutzung der Effizienzpotenziale der Energienachfrage. Dabei ist der Einsatz von technologischen Optionen, die auf eine Steigerung der Energieeffizienz ausgerichtet sind, der Option eines Energieträgerwechsels vorzuziehen, da erstere sowohl Energieflüsse als auch Emissionen reduzieren. Bei der Kombination von Maßnahmen ist auf ihre Addierbarkeit zu achten, d.h. dass Emissionsreduktionspotenziale einander beeinflussen oder (teilweise) ausschließen können. Ein weiterer Aspekt, der im Projekt EnergyTransition bei der Entwicklung von Technologieoptionen beleuchtet wird, ist die teilweise lange Nutzungsdauer von Technologien. Um technologische Lock-in-Effekte[4] zu vermeiden, gilt es daher eine langfristige Perspektive mitzudenken. Eine Restrukturierung des Energiesystems erfordert beträchtliche Investitionsmittel, die dementsprechende Output- und Beschäftigungseffekte bewirken. Die Umsetzung etwa eines Maßnahmenbündels von achtzehn Technologieoptionen mit einem Fokus auf Energieeffizienz würde ein zusätzliches jährliches Investitionsvolumen von 6,3 Mrd. € im Zeitraum 2012 bis 2020 erfordern (Köppl et al., 2011). Demgegenüber steht ein Output-Effekt von ca. 9,5 Mrd € und etwa 80 000 zusätzlichen Beschäftigungsverhältnissen. Gleichzeitig liegen die Betriebskosteneinsparungen im Jahr 2020 (unter eher konservativen Annahmen bezüglich zukünftiger Energiepreise) bei 4,3 Mrd. € (Köppl et al., 2011).

Die durch dieses Maßnahmenbündel ausgelösten Emissionsminderungen verteilen sich auf die Bereiche Energiebereitstellung, Mobilität und Gebäude. Der Beitrag des Sektors Energiebereitstellung (6 Mt CO_2-Äq.) im Vergleich zu einem Referenzszenario resultiert dabei aus der geringeren Nachfrage nach Elektrizität und Wärme in den Bereichen Mobilität, Gebäude und Produktion. Aus dem Bereich Mobilität resultieren Einsparungen von 2,8 Mt CO_2-Äq., der Gebäudebereich trägt 3,2 Mt CO_2-Äq. bei und die Einsparungen aus dem Sektor Produktion machen 1,8 Mt CO_2-Äq. aus.

Investitionseffekte beziehen sich auf die Transformationsphase, während Betriebseffekte – in der Regel Energiekosteneinsparungen – über die gesamte Nutzungsdauer der Technologie wirken. Für einen Vergleich von Maßnahmen in Hinblick auf die ausgelösten ökonomischen Wirkungen in der Investitions- und Betriebsphase gilt es daher die unterschiedlichen Nutzungsdauern von Technologien zu berücksichtigen.

Für eine Bewertung von Reduktionspotenzialen sind darüber hinaus noch weitere Aspekte von Relevanz. Eine Verbesserung des Gebäudebestands beispielsweise geht über den Aspekt des geringeren Energieverbrauchs hinaus und trägt insgesamt zu einer Verbesserung der Wohnqualität sowie zu einer Wertsicherung oder Wertsteigerung des Gebäudes bei.

[4] Investitionsentscheidungen, die eine lange Nutzungsdauer haben, bestimmen über mehrere Jahrzehnte den Technologiestandard. Investitionen heute in fossile Kraftwerke etwa, haben über mehrere Jahrzehnte einen Einfluss auf die Emissionsintensität der Elektrizitätserzeugung. Ein anderes Beispiel stellt ein schlechter thermischer Sanierungsstandard dar, der den Wärmebedarf eines Gebäudes über mehrere Jahrzehnte Nutzungsdauer bestimmt.

Umsetzung der Klimaschutzpolitik in Österreich

Die österreichische Klimaschutzpolitik ist von den oben beschriebenen internationalen und europäischen Rahmenbedingungen direkt oder indirekt betroffen. Im Rahmen des Europäischen „Burden Sharing Agreements" zur Umsetzung des Kyoto-Protokolls hat sich Österreich verpflichtet, eine THG-Reduktion von 13 % im Zeitraum 2008 bis 2012 gegenüber 1990 zu realisieren (Haug und Jordan, 2010). Da sich schon früh zeigte, dass Österreich sein Kyoto-Ziel mangels wirksamer Klimaschutzpolitik nicht im Inland erreichen wird, wurde im Jahr 2003 das österreichische Ankaufsprogramm[5] für Zertifikate aus den flexiblen Mechanismen Joint Implemetation (JI) und Clean Development Mechanism (CDM) ins Leben gerufen. Für den Zeithorizont bis 2020 hat Österreich die EU 20-20-20 Ziele (EK, 2008) zu erfüllen und zwar durch eine THG-Minderung im Nicht-ETS Bereich bis 2020 um 16 % gegenüber 2005 (European Parliament and the Council of the EU, 2009), sowie durch eine Steigerung des Anteils der Erneuerbaren Energieträger am Gesamtenergieverbrauch auf 34 %. Ohne nennenswerte klima- und energiepolitische Maßnahmen werden jedoch auch diese Ziele verfehlt werden. Gemäß den vom Umweltbundesamt alle zwei Jahre veröffentlichten Projektionen der THG-Emissionen Österreichs, ist auf Basis der aktuell in Kraft befindlichen Maßnahmen mit einer Steigerung der aktuellen THG-Emissionen auf über 90 Mt CO_2-Äq. bis 2030 zu rechnen. Werden auch die derzeit geplanten politischen Maßnahmen berücksichtigt, geht das Emissionsszenario von einer leichten Senkung der aktuellen THG-Emissionen aus (vgl. Abb. 1.8). Diese werden für eine Erreichung des oben genannten Reduktionsziels jedoch bei weitem nicht ausreichen (vgl. Abb. 1.8).

Klimaschutzpolitik im Überblick und sektorale Integration

Im Jahr 2002 hat die österreichische Bundesregierung eine erste Klimastrategie beschlossen. Da die Strategie wenig Effekt zeigte und der 2005 eingeführte Emissionshandel eine Überarbeitung erforderlich machte, hat die Bundesregierung 2007 eine aktualisierte Klimaschutzstrategie beschlossen. Ziel der Klimaschutzstrategie ist es Klimaschutzmaßnahmen transparent darzustellen und die Erreichung des Kyoto-Ziels in sämtlichen Sektoren zu koordinieren. Auch die Koordination von

[5] Die Grundlagen für das österreichische JI / CDM-Programm sind in den „Richtlinien für das österreichische JI / CDM-Programm" des BMLFUW (2007a) festgelegt.

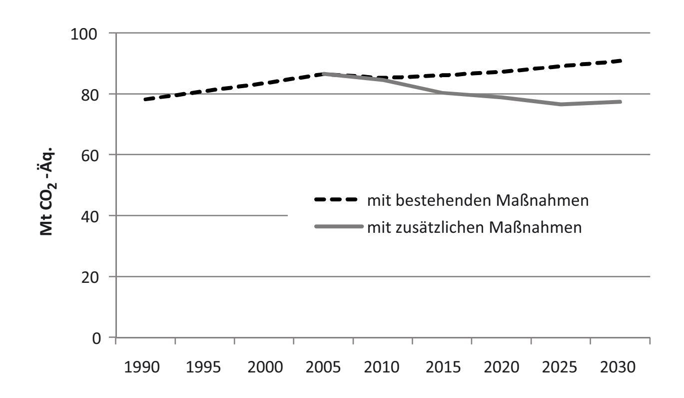


Abbildung 1.8 Projizierte Entwicklung der THG-Emissionen in Österreich in Mt CO_2-Äq., mit bestehenden und mit zusätzlichen Maßnahmen. Quelle: Anderl et al. (2011b)

Figure 1.8 Projected development of greenhouse gas emissions in Austria in Mt CO_2-eq., with existing and additional measures. Source: Anderl et al. (2011b)

Bundes- und Länderpolitiken (z. B. zu Kleinverbrauch / Raumwärme / Warmwasser) wird in der Strategie thematisiert, allerdings sehr unverbindlich. Wie die oben beschriebene Emissionsentwicklung der vergangenen Jahre unmissverständlich illustriert (vgl. Abbildung 1.6 und Abbildung 1.8), war auch die Klimaschutzstrategie aus dem Jahr 2007 nicht in der Lage, die österreichische Klimaschutzpolitik effektiver zu gestalten und die steigenden Trends bei THG-Emissionen umzudrehen.

Nach mehreren Jahren des klimapolitischen Stillstands wurde im Jahr 2011 im Ministerrat der Bundesregierung die österreichische Energiestrategie (BMLFUW und BMWFJ, 2010) vorgestellt und vom Nationalrat das Klimaschutzgesetz – KSG (BGBl I 106/2011) beschlossen. Die Energiestrategie und das KSG bilden den Rahmen für eine Reduktion des Energieverbrauchs und eine Reduktion der THG-Emissionen in jenen Bereichen, welche nicht dem European Emission Trading Scheme (EU-ETS) unterliegen. Beide sind u. a. politische Reaktionen auf die Tatsache, dass die Klimastrategie 2007 kaum zur Reduktion von THG-Emissionen beigetragen hat und Österreich das Kyoto-Ziel mit eigenen Klimaschutz-Maßnahmen nicht erreichen wird (Warnstorff 2012; vgl. auch BMLFUW, 2007b; Anderl et al., 2012a). Auf Basis dieser einerseits strategischen und andererseits gesetzlichen Rahmenbedingungen sind diverse Maßnahmen und Umsetzungsschritte zu implementieren.

Die Energiestrategie (BMLFUW und BMWFJ, 2010) wurde vom Wirtschaftsministerium in Zusammenarbeit mit dem Lebensministerium erarbeitet. Sie strebt eine Stabilisierung des Energieverbrauchs im Jahr 2020 auf dem Niveau von 2005 an, das sind 1 100 PJ, ohne dass im Rahmen dieses strategischen Dokuments bereits verbindliche Schritte gesetzt werden (vgl.

auch Band 3, Kapitel 3). In einer Studie (WIFO et al., 2009) wird in mehreren Szenarien der Entscheidungsspielraum für die Restrukturierung des österreichischen Energiesystems in Hinblick auf die Erreichung der EU-Ziele aufgezeigt. Ausgehend von Energiedienstleistungen wird das Potenzial für Effizienzsteigerungen und erneuerbare Energien in Relation zu einem Basisszenario evaluiert. Neben der Sensitivität der Annahmen in Bezug auf die Energiemengen zeigen die Szenarien den weiteren Entscheidungsbedarf bezüglich der Aufteilung der Energieflüsse auf die Wirtschaftssektoren und die einzelnen Energieträger auf.

Das KSG sieht sektorspezifische Reduktionen vor. Die wichtigsten spezifisch sektoralen Maßnahmen auf nationaler Ebene betreffen die Strom-, bzw. Wärmeerzeugung und -verteilung sowie den Verkehr. Da die Bundesregierung in einigen Sektoren (v. a. Raumwärme) stark auf entsprechende politische Bemühungen der Bundesländer angewiesen ist, zielt das KSG darauf ab, die Zusammenarbeit mit den Bundesländern zu verbessern (Parlament, 2011; BGBl I 106/2011). Dabei diente der britische Climate Change Act als Modell (Lebensministerium, 2010). Da es ein wesentliches Ziel des Gesetzes ist, die Bundesländer zu den in der Klimaschutzstrategie 2007 formulierten Zielen zu verpflichten und an etwaigen Kosten der Zielverfehlung zu beteiligen, waren die Verhandlungen zwischen Bund und Ländern zäh und lang (das KSG stand bereits 2007 im Regierungsprogramm und ein Inkrafttreten war für 2009 vorgesehen). Die im Jahr 2011 beschlossene Fassung sieht schließlich für die Länder im Fall einer Verfehlung des Kyoto-Zieles bis 2012 weder Sanktionen noch eine finanzielle Beteiligung am Zukauf von Emissionszertifikaten vor. Außerdem fehlt eine Einigung darüber, wie etwaige Kosten für verfehlte Klimaschutzziele zwischen Bund und Ländern nach 2013 aufzuteilen sind. Sollte diese zusätzlich notwendige Vereinbarung nicht zustande kommen, ist eine 50 : 50 Lastenteilung zwischen Bund und Ländern vorgesehen. Sollten sich die Länder nicht auf einen Teilungsschlüssel einigen, wird die Bevölkerungszahl der Bundesländer herangezogen (Warnstorff, 2012).

In Köppl et al. (2012) werden Effekte von Maßnahmenpaketen bezüglich der Reduktionspotenziale von einzelnen Sektoren bezüglich ihrer Auswirkungen auf Energiedienstleistungen, Energieproduktivität und den Energiemix beurteilt. Dabei wurden drei Umsetzungsstrategien abgeschätzt, die sich in ihrem Ambitionsniveau unterscheiden: Strategie 1 politikfortführend mit zusätzlichen Maßnahmen, Strategie 2 strukturverändernd mit mittelfristigen Perspektiven, Strategie 3 technologieforcierend mit langfristigen Perspektiven. Die quantitative Bewertung der Maßnahmenpakete geht von einer Laufzeit von rund zehn Jahren und einem sofortigen Umsetzungsbeginn aus.

Das KSG sieht auch die Schaffung von zwei neuen Gremien vor: das Nationale Klimaschutzkomitee, zusammengesetzt aus hochrangigen VertreterInnen der Bundes- und der Landesregierungen sowie der Sozialpartner, soll Grundsatzfragen im Klimaschutz erörtern sowie Klimaschutzstrategien ausarbeiten. Der nationale Klimaschutzbeirat hingegen, zusammengesetzt aus VertreterInnen der Politik, Sozialpartnerschaft, Umweltschutzorganisationen, Wirtschaft und Wissenschaft, soll das nationale Klimaschutzkomitee beraten (BGBl I 106/2011; respACT 2011).

Weiters sind Prozesse festgehalten, wie etwa das Einsetzen von Arbeitsgruppen zur Ermittlung von sektorspezifischen Reduktionspotenzialen sowie die Erarbeitung von Maßnahmen und die Festlegung von Verantwortlichkeiten zur Erreichung dieser Emissionsminderungen. Die in den Arbeitsgruppen erarbeiteten Ergebnisse sollen die Grundlage für Entscheidungen im Nationalen Klimaschutzkomitee darstellen.

Durch das Ökostromgesetz (BGBl. I 149/2002; BGBl. I 2011/75; vgl. dazu auch Band 3, Kapitel 3) werden Ziele beim Ausbau erneuerbarer Energieträger zur Stromerzeugung bis 2020 vorgegeben und damit Teile der Vorgaben der RED umgesetzt. Die Ausbauziele führen bei vollständiger Umsetzung zu einer Steigerung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen um insgesamt 10.5 TWh (laut Ökostrombericht 2012, Energie-Control Austria, 2012). Der Schwerpunkt soll dabei sowohl auf dem Ausbau von Wasserkraftanlagen mit einer Engpassleistung unter 20 MW als auch auf Windkraftanlagen liegen; der übrige Ausbau soll gleichermaßen mit Photovoltaik und Biomasse erfolgen. Die Überwachung der Zielerreichung soll durch die Strommarkt-Regulierungsbehörde (ECA) erfolgen.

Das KWK-Gesetz (BGBl. I 2008/111) regelt die Unterstützung von bestehenden KWK-Anlagen zur öffentlichen Fernwärmeversorgung, um deren weiteren Betrieb sicherzustellen und deren Modernisierung zu fördern, wobei die Einsparung von CO_2-Emissionen eine der Voraussetzungen für diese Unterstützung ist. In diesem Gesetz wird auch die nationale Umsetzung der KWK-Richtlinie vollzogen. Das Wärme- und Kälteleitungsausbaugesetz (BGBl. I 113/2008) fördert den Ausbau von Wärme- und Kältenetzen auf Basis nicht-erneuerbarer Energieträger mit dem Ziel, die Emission von 3 Mt CO_2 zu vermeiden.

In manchen EU-Mitgliedstaaten werden die Abtrennung und geologische Speicherung von CO_2 (CCS) sowie der Einsatz von Nuklearenergie als möglicher Lösungsweg zur Vermeidung der Freisetzung von CO_2 in die Atmosphäre be-

trachtet. Aufgrund der mit diesen Technologien verbundenen Risiken wurde in Österreich beschlossen, die Nutzung von Nuklearenergie vollständig sowie die von CCS im großtechnischen Maßstab zu verbieten (BGBl. I 149/1999, BGBl. I 144/2011).

Der Verkehrssektor (vgl. dazu auch Band 3, Kapitel 3) – und hier speziell der Straßenverkehr – war 2010 für ca. ein Drittel der CO_2-Emissionen aus der energetischen Nutzung von Energie verantwortlich und lieferte damit den größten Einzelbeitrag. Dieser Anteil ist seit 1970, von damals rund 20 % – was für keinen anderen Sektor zutrifft – beständig und deutlich gestiegen. Gründe sind die weitgehende Nicht-Ausübung einer effektiven überörtlichen Raumordnung welche sich vor allem in der ungebremst zunehmenden Zersiedelung und der weitgehend verkehrstechnisch nicht koordinierten außerörtlichen Einkaufszentren-Entwicklung manifestiert. Dies führt zu einer verstärkten Abhängigkeit vom motorisierten Individualverkehr, da eine vielerorts über lange Zeiträume anhaltende Schwächung, bzw. nur zögerliche Förderung des öffentlichen Verkehrs, der Fußläufigkeit oder der Radinfrastruktur zu beobachten ist. Auch fiskalische Aspekte sind von Bedeutung, wie etwa die seit dem Ende der 1990er Jahre – im Vergleich zum angrenzenden Ausland – niedrigere Mineralölsteuer und damit verbundene geringere Treibstoffpreise, die zu preisinduziertem Kraftstoffexport im Tank (auch oft verkürzt als „Tanktourismus" bezeichnet) führen (Anderl et al., 2011b).

Für die Abschwächung der THG-Zuwächse aus dem Verkehr gilt die Biokraftstoffverordnung (BGBl. II 168/2009) als bisher effektivste Maßnahme, in der die Beimischung von biogenen Anteilen in den Kraftstoffen geregelt wird. Eine weitere gesetzliche Maßnahme zur CO_2-Reduktion ist die Gestaltung der Normverbrauchsabgabe (NoVA), aber auch die Verwendung der Mittel aus erhöhter Mineralölsteuer für den Ausbau des öffentlichen Verkehrs (woraus etwa in der Steiermark die Einführung der S-Bahn im Jahr 2007 finanziert wurde). Für weitere, detaillierte Ausführungen – vgl. Band 3, Kapitel 3 zu Energie und Verkehr.

Bundesländer

In den für den Klimaschutz zentralen Sektoren Gebäude, Verkehr, Landwirtschaft und Sonstige (wie z. B. Abfallwirtschaft) liegen zentrale Kompetenzen zur Reduktion der THG-Emissionen bei den Bundesländern bzw. den ihnen nachgeordneten Ebenen. Daher wurden zur Umsetzung der entsprechenden europäischen Richtlinien (ESD, EPBD) zwischen dem Bund und den Bundesländern §15a-B-VG-Vereinbarungen (BGBl. II 168/2009; BGBl. II 251/2009) geschlossen.

Wie für die Bundesländer Steiermark (Wolkinger et al., 2012) und Salzburg (Steininger et al., 2012) im Detail dargelegt wurde, sind die EU-Ziele im Nicht-ETS Bereich für den Zeithorizont 2020 auf Ebene der Bundesländer erreichbar, wenn entsprechende Maßnahmen rechtzeitig und zielstrebig gesetzt werden.[6] Dies gilt insbesondere für das Ziel zur Erhöhung des Anteils von Erneuerbaren Energieträgern am Gesamtenergieverbrauch.[7] Obwohl das Gesetz festlegt, dass Verhandlungen zwischen Bund und Ländern zu führen sind, mit welchen Maßnahmen (bzw. mehrjährigen Maßnahmenprogrammen) die EU-Klimaschutzziele zu erreichen sind, konnten bis zum ersten im Gesetz festgehaltenen Terminziel eines Verhandlungsabschlusses (für die Verpflichtungsperiode 2013 bis 2020 war dies der 31. März 2012)

---

[6] Methodisch gingen diese Studien in einem Fünf-Stufen-Prozess vor, wobei auf jeder Stufe die relevanten StakeholderInnen einbezogen wurden: (1) Definition regionaler Klimaziele, (2) Reduktionspotenziale, (3) Maßnahmepaket(e), (4) Implementierungsplan, (5) Monitoring. Kernelement darin ist eine regionalisierte Verwendung des Wedge-Konzepts (Pacala und Socolow, 2004), die eine konsistente (d. h. Doppelzählungen vorbeugende) Quantifizierung der Emissionsreduktion nach Bereichen erlaubt, die erst nach zugehöriger Konsenserzielung mit allen StakeholderInnen (Stufe 2) durch Maßnahmen unterlegt werden und eine Einigung darauf erzielt wird (Stufe 3). Konkrete Zeitpläne und vor allem die kontinuierliche Feinabstimmung im Zuge des Monitoring (Stufen 4 und 5) sichern die Zielerreichung ab.

[7] Für den Beitrag auf Länderebene zum Ziel Erneuerbare (Anteil der Erneuerbaren in der Raumwärme, landeseigene Elektrizitätsversorger, Förderung von produktionsseitiger Wärme-Kraft-Kopplungen in der Nutzung Erneuerbarer) kann für die Bundesländer Steiermark (Wolkinger et al., 2012) und Salzburg (Steininger et al., 2012) gezeigt werden, dass die vorhandenen Potentiale ausreichen, um mit der Setzung der THG-Maßnahmen im Zeithorizont 2020 gleichzeitig auch das Ziel Erneuerbare zu erreichen. Als Aufteilungsregel des nur auf Bundesebene formulierten Ziels für Erneuerbare wird dabei der aus der Österreichischen Energiestrategie (BMWFJ und BMLFUW, 2010) ableitbare Ausbau der Erneuerbaren bis 2020 (Erhöhung um 69,6 PJ; Jahreswert) anhand des Aufteilungsschlüssels „Anteil des Bundeslandes an Bruttowertschöpfung des Bundes" verwendet. Für darüber hinausgehende Zeithorizonte (Wolkinger et al., 2012) und Steininger et al., 2012) untersuchen 2030 bzw. 2050 auf Bundeslandebene) lassen sich indikative EU-Ziele für den Nicht-ETS Bereich ableiten. Die Erreichung von THG-Zielen im Nicht-ETS-Bereich ist dann – sofern die Beschränkung „politisch derzeit akkordierbar" unterlegt wird – nur mehr mit einer Kombination von (doch umfassenden) Maßnahmen mehrerer Verwaltungsebenen (insbesondere des Bundes und der Länder) erreichbar.
Wird für das Ziel Erneuerbare ein Zielpfad hinterlegt, wie etwa im Bundesland Salzburg in Diskussion (von derzeit 40 % Anteil, Steigerung auf 50 % (2020), 65 % (2030), 85 % (2040), 100 % (2050)), so ist dies nur erreichbar, wenn frühzeitig sehr hohe Anstrengungen im Bereich Gesamtbedarfsreduktion (durch Suffizienz wie Energieeffizienz) unternommen werden, da sonst die regional verfügbaren erneuerbaren Potenziale (wie sie derzeit bekannt sind) nicht ausreichen.

keine Maßnahmen bzw. Maßnahmenprogramme akkordiert werden.

Auf der Bundeslandebene selbst sind explizit auf den Klimaschutz ausgerichtete Programme seit Ende der 1990er Jahre in Kraft. Für Wien wurde das Klimaschutzprogramm KliP (nunmehr KliP 1) erstmalig im Jahr 1999 beschlossen, das Niederösterreichische Klimaprogramm trat erstmals 2004 in Kraft. Beide Programme identifizieren und definieren Maßnahmen und Umsetzungsverantwortlichkeiten. Die jüngsten Klimaschutzpläne (für die Bundesländer Steiermark 2010; Salzburg 2011) sind dadurch gekennzeichnet, dass sie zusätzlich die Zielerreichung quantifizieren (THG-Reduktionen für die einzelnen Bereiche) und damit einerseits einen THG-Reduktions-Zielpfad, andererseits die Basis für ein Zielerreichungs-Monitoring vorgeben. Die anderen Bundesländer betreiben ihre spezifischen Projekte und Förderungen – insbesondere in den Bereichen Raumwärme, Mobilität oder Ernährung (z. B. Oberösterreich, Tirol, Vorarlberg) – ohne Eingliederung in ein zusammenfassendes eigenes Klimaschutzprogramm, bzw. haben die Erstellung eines Klimaschutzprogramms derzeit in Vorbereitung (z. B. das Burgenland).

Die verfügbaren Analysen (Wolkinger et al., 2012; Steininger et al., 2012) zeigen, dass die ambitionierten Ziele betreffend der THG-Reduktion, insbesondere aber betreffend des Anteils erneuerbarer Energieträger, im Wesentlichen im Zeithorizont bis 2030 nur dann erreichbar sind, wenn neben dem Umstieg in der Energieversorgung auf Erneuerbare Energie umgehend auch die Minderung des Gesamtenergieverbrauchs angestrebt und erreicht wird (vgl. Fußnote 7).

Umsetzung des ETS in Österreich

Für die Umsetzung des ETS in Österreich dürften die Befunde gelten, die in Abschnitt 1.1.2 bereits zur Umsetzung des ETS in Europa allgemein zusammengefasst wurden. Wie andere Mitgliedstaaten war auch Österreich in den ersten beiden Phasen des ETS in erster Linie darum bemüht, nicht das Klima sondern die heimische Industrie vor anspruchsvollen Klimaschutzzielen zu schützen. Im bisherigen Verlauf der Kyoto-Verpflichtungsperiode 2008 bis 2012 überstiegen die Emissionen in Österreich 2008 die Allokation, vor allem in der Elektrizitätserzeugung und in der Stahlindustrie (Kettner et al., 2011a, 2013). Im Zuge der Finanzmarkt- und Wirtschaftskrise gingen auch die Emissionen in den Emissionshandelssektoren stark zurück; in fast allen Sektoren ergab sich daher im Jahr 2009 ein Überschuss an Emissionszertifikaten. 2010 fiel der Überschuss an Zertifikaten deutlich geringer aus, vor allem weil die Emissionen in der Elektrizitätserzeugung stiegen und sich die Industrieproduktion erholte (Kettner et al., 2011a, 2013).

In der Pilotphase 2005 bis 2007 des ETS hatte die EK relativ wenig Einfluss auf die Allokationspläne der Mitgliedstaaten (einschließlich jener Österreichs), weshalb es zu großzügigen nationalen Zuteilungen kam. Für die zweite Phase 2008 bis 2012 wurde dies mit einer Entscheidung der EK abgeändert, wodurch Kürzungen seitens der EK möglich wurden, im Fall von Österreich um ca. 2 Mt CO_2-Äq. Mit den Reformen des ETS auf europäischer Ebene für die dritte Phase könnte sich die Wirksamkeit des Instruments auch in Österreich zukünftig erhöhen (Laing et al., 2013).

Zukauf von internationalen Emissionszertifikaten

Um die Lücke zwischen Emissionen und Ziel zu schließen wurde durch das JI / CDM-Programm – welches von der Kommunalkredit Public Consulting abgewickelt wird – budgetäre Mittel zum Zukauf von zuerst 45 Mt CO_2-Äq. gesichert (Anderl et al., 2013). Die Zielerreichung wurde durch weitere Zukäufe abgedeckt; so wurden im April 2012 160 Mio. € für sogenannte Green Investment Scheme (GIS) Zukäufe budgetiert und ein Teil davon bereits ausgegeben. Die Kosten, die für Österreich entstehen, um durch den Zukauf von ausländischen Emissionszertifikaten sein Kyoto Ziel abzudecken, wurden im Wesentlichen von den Preisen für diese Zertifikate bestimmt, sowie vom Ausmaß der tatsächlichen Kyoto-Lücke. Österreich konnte dabei von den stark fallenden Zertifikatspreisen profitieren, im Jahr 2012 sanken diese teilweise auf einen Wert von unter 2 bis 3 € / t (Tuerk et al., 2013). Wie der starke Rückgang der THG-Emissionen im Jahr 2009 und danach aufgrund des Wirtschaftseinbruchs zeigt, hing dieser stark von der wirtschaftlichen Aktivität ab.

1.2 Anpassung
1.2 Adaptation

Dieses Kapitel fasst den Wissensstand bezüglich der Notwendigkeit zur Anpassung an den Klimawandel zusammen, wobei eine Darstellung auf internationaler, europäischer und österreichischer Ebene erfolgt. Zudem werden der Stand der politischen Umsetzung, damit verbundene Chancen sowie die Integration von Anpassung in andere Politikfelder behandelt.

Unter Anpassung versteht man Initiativen und Maßnahmen, die gesetzt werden, um die Empfindlichkeit natürlicher oder menschlicher Systeme gegenüber tatsächlichen oder erwarteten Auswirkungen der Klimaänderung zu verringern

(IPCC, 2007c). Anpassungsaktivitäten zielen darauf ab, die Verwundbarkeit (Vulnerabilität) gegenüber der Klimaänderung zu reduzieren bzw. die Widerstandsfähigkeit (Resilienz) zu erhöhen, sowie mögliche positive Effekte infolge veränderter klimatischer Bedingungen zu nutzen.

Trotz bestehender Unsicherheiten über das konkrete Ausmaß der Klimawandelfolgen für die unterschiedlichen Regionen und Bereiche ist die frühzeitige Planung und Durchführung von konkreten Anpassungsmaßnahmen von großer Wichtigkeit. Ein Zuwarten verringert die Möglichkeit für eine erfolgreiche Anpassung und erhöht die damit verbundenen Kosten (IPCC, 2007b). Für die vorausschauende Planung und Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen steht eine breite Auswahl von Möglichkeiten zur Verfügung, die sowohl von betroffenen BürgerInnen als auch von Gemeinden / Regionen oder privaten und öffentlichen Einrichtungen durchgeführt werden können, wie z. B. technologische Maßnahmen, Wissenserweiterung oder Bewirtschaftungsänderungen (vgl. Tabelle 1.4).

Die globale Perspektive bezüglich Anpassung

Tabelle 1.4 gibt einen Überblick über Meilensteine bezüglich Anpassung an den Klimawandel. Einen Ausgangspunkt stellt dabei die Toronto Konferenz (1988) dar, selbst wenn die Anpassung an den Klimawandel dort noch kein explizites Thema war.

Der Überblick zeigt, dass auf internationaler Ebene beginnend ab 1994 im Rahmen der „United Nations Conven-

Tabelle 1.4 Meilensteine zur Anpassung auf globaler Ebene. Quellen: UNFCCC (2012d); IPCC (2012b); Bodansky (2001)
Table 1.4 Milestones to adaptation at the global scale. Sources: UNFCCC (2012d); IPCC (2012b); Bodansky (2001)

Datum	Meilenstein	Beschreibung
April 1988	Toronto Konferenz	WissenschaftlerInnen und RegierungsvertreterInnen diskutieren Möglichkeiten des Klimaschutzes. Industrieländer, darunter Österreich, versprachen, auf freiwilliger Basis, ihren Kohlendioxidausstoß bis 2005 um 20 % zu reduzieren.
Dezember 1988	Gründung des IPCC	3 Arbeitsgruppen (Wissenschaftliche Aspekte des Klimasystems und des Klimawandels; Verletzlichkeit und Anpassung; Minderung der Treibhausgasemissionen)
1990	IPCC	Erster Zustandsbericht; thematisiert auch Anpassung
Juni 1992	Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen (UNFCCC)	Die Klimarahmenkonvention anerkennt die Vulnerabilität aller Staaten gegenüber dem Klimawandel und ruft zu besonderen Anstrengungen auf, die Auswirkungen auf jene Entwicklungsländer zu mildern, welchen die notwendigen Ressourcen dies selbst zu tun, fehlen. Anpassung wurde zunächst weniger Aufmerksamkeit geschenkt verglichen mit Mitigation; dies änderte sich jedoch sobald die Verletzlichkeiten gegenüber dem Klimawandel und die Auswirkungen desselben deutlicher wurden.
Juni 1994	Übereinkommen der Vereinten Nationen zur Bekämpfung der Wüstenbildung (UNCCD)	Vorrangiges Ziel der Konvention ist es, in von Dürre und / oder Wüstenbildung schwer betroffenen Ländern, insbesondere in Afrika, durch wirksame Maßnahmen Dürrefolgen auf allen Ebenen zu mildern und zu bekämpfen.
2001	IPCC	Dritter Zustandsbericht; konkretere Hinweise auf mögliche Auswirkungen des Klimawandels
November 2001	COP 7 – Marrakech Accords	Entscheidung 5 / CP.7 der 7. Vertragsstaatenkonferenz (COP) anerkannte die Notwendigkeit der Unterstützung der am wenigsten entwickelten Staaten (Least Developed Countries – LDCs) bezüglich Anpassung an den Klimawandel und beschloss ein LDC-Arbeitsprogramm, welches u. a. NAPAs (National Adaptation Programmes of Action) beinhaltet (UNFCCC, 2002).
Dezember 2005	COP 11 – Nairobi work programme (NWP)	Entscheidung 2 / CP.11 – Mandat für das NWP (UNFCCC, 2006)
März 2010	SBSTA 32 Synthesis Report under the NWP on costs & benefits	Synthesebericht zur Erhebung der Kosten und Nutzen von Möglichkeiten zur Anpassung, sowie von Erfahrungen, guter Praxis, Lücken und weiterem Bedarf (UNFCCC, 2010c).
Dezember 2010	COP 16 – Cancun Adaptation Framework (UNFCCC, 2011a)	- Nationale Anpassungs-Pläne (National Adaptation Plans - NAPs) - Arbeitsprogramm zu Verlusten und Schäden (Work programme on loss and damage, UNFCCC, 2011b)
Dezember 2011	COP 17 – Enhanced action on adaptation (UNFCCC, 2012b)	- Anpassungs-Komitee (Adaptation Committee)
März 2012	IPCC Special Report on Extreme Weather Events	Sonderbericht zu extremen Wetterereignissen (IPCC, 2012a)

tion to Combat Desertification“ (UNCCD) und ab 2001 unter der UNFCCC in Form der „National Adaptation Programmes of Action“ (NAPAs) zunächst die Unterstützung der gegenüber dem Klimawandel am meisten verletzlichen Staaten im Vordergrund stand. Die ersten NAPAs konnten 2006 vorgelegt werden. Mittlerweile haben mit Angola (Dezember 2011) 47 der „Least Developed Countries“ (LDCs) und somit alle in dieser Gruppe subsumierten Staaten mit Ausnahme Somalias sogenannte NAPAs erstellt. Mit Stand März 2012 werden infolge dessen bereits mehr als 60 Projekte zur Anpassung an den Klimawandel finanziell unterstützt. Eine eigene Expertengruppe (LDC Expert Group) unterstützt die Erstellung und Implementierung der NAPAs. Neun Jahre nach dem bahnbrechenden Beschluss von 2001 zu NAPAs einigte man sich 2010 in Cancun zusätzlich auf den systematischeren Ansatz von „National Adaption Plans“ (NAPs), deren Inhalte im darauffolgenden Jahr konkretisiert werden konnten. Hinsichtlich der Frage der Finanzierung konnten bei den Vertragsstaatenkonferenzen 2012 und 2013 Fortschritte erzielt werden; inwieweit eine derartige Unterstützung auch für andere Entwicklungsländer gewährt werden kann, wird wohl generell nicht beschlossen werden können, doch ist eine solche Möglichkeit grundsätzlich eröffnet worden.

Es ist bis jetzt noch nicht möglich, eine aussagekräftige Bewertung der im Rahmen von NAPAs eingeleiteten Maßnahmen auf Grundlage tatsächlich feststellbarer Verbesserungen für die Bevölkerung in den LDCs vorzunehmen. Dies gilt naturgemäß in noch stärkerem Maß bezüglich der NAPs.

Vergleicht man die zur Umsetzung bzw. Unterstützung verfügbaren Mittel (20 Mio. $ je LDC [UNFCCC, 2012e]) wird deutlich, dass zusätzliche Geldmittel zur Umsetzung aller von den LDCs vorgesehenen Projekte erforderlich sind.

Allen Staaten, einschließlich der Industriestaaten, stehen beginnend ab 2006 Informationen, Ergebnisse und Erfahrungen zur Anpassung zur Verfügung, welche im Rahmen des „Nairobi Work Programme“ (NWP) ausgetauscht werden. Im Rahmen dieses Programms besteht auch die Möglichkeit über sogenannte Call for Actions zweckdienliche Entwicklungen in anderen Organisationen außerhalb der UNFCCC anzustoßen. Die Partizipation an diesen Calls nimmt weiter zu und mit Stand April 2012 hält man bei 251 teilnehmenden Organisationen und 168 sogenannten Action Pledges von 74 der 251 teilnehmenden Organisationen. Für die praktische Gestaltung der Zusammenarbeit bezüglich Anpassung innerhalb und außerhalb der UNFCCC wurde 2011 ein Gremium von 16 Personen, das sogenannte Adaptation Committee, geschaffen.

Ausgehend von der Initiative potentiell besonders vom Klimawandel betroffener Regionen, wie der kleinen Inselstaaten, thematisiert der Sonderbericht des IPCC zum Thema „Klimawandel und Extremereignisse“ (IPCC, 2012a) die wachsende Bedrohung durch die Folgen des Klimawandels für sehr viele Regionen insbesondere im Hinblick auf die Zunahme von Hitzewellen, Dürren und Starkregenereignissen. Der Bericht

Tabelle 1.5 Unterschiedliche Dimensionen von Klimawandelanpassung. Quelle: Prutsch et al. (unveröffentlicht); basierend auf Smith et al. (2000); Lemmen et al. (2008); Adger et al. (2007); UKCIP (2005); EK (2009d)

Table 1.5 Different dimensions of adaptation to climate change. Source: Prutsch et al. (unpublished); based on Smit et al. (2000); Lemmen et al. (2008); Adger et al. (2007); UKCIP (2005); EK (2009d)

Dimensionen	Anpassungsbereiche						Wesentliche Fragen
Klimasignal	vergangene Klimaveränderungen	gegenwärtige Klimavariabilitäten	zukünftige Klimaveränderungen				Anpassung an WAS?
Auswirkungen	direkte Klimawandelauswirkungen	indirekte Klimawandelauswirkungen					
AkteurInnen (Auswahl)	Individuen	Betriebe	NGOs	Regierungen			WER oder WAS passt sich an?
Sektoren / Bereiche (Auswahl)	Wasser	Landwirtschaft	Industrie	Gesundheit	Tourismus		
Entscheidungsebene (Auswahl)	lokal	regional	national	europäisch	international	multi-level	
Zeitliche Dimension	kurzfristig	mittelfristig	langfristig				WIE wird angepasst?
Reaktion	autonom / reaktiv	geplant / proaktiv					
Art (Auswahl)	informativ	rechtlich	technologisch	Portfolio von verschiedenen Typen			
Ansatz	top-down	top-down und bottom-up kombiniert	bottom-up				

zeigt, dass sich Wetterextreme in ihrer Häufigkeit, Stärke und Dauer infolge des Klimawandels schon heute verändert haben und mit steigenden THG-Emissionen eine weitere Verschlimmerung zu erwarten ist. So könnte sich beispielsweise die Wahrscheinlichkeit von Hitzewellen bis Ende des Jahrhunderts in vielen Regionen verzehnfachen. Der Sonderbericht zu Extremereignissen informiert u. a. über kurzfristig wirksame Anpassungsmaßnahmen und schlägt diesbezüglich eine Vielzahl von Strategien und sonstigen Möglichkeiten zur Erhöhung der Resilienz vor.

Eine Studie des Sekretariats der Klimarahmenkonvention (UNFCCC, 2010b) kommt auf Grundlage mehrerer Studien zum Schluss, dass die durch den Klimawandel bedingten Schäden in Entwicklungsländern im Jahr 2030 grob geschätzt zwischen 30 und 90 Mrd. $ betragen werden, sofern keine Anpassungsmaßnahmen gesetzt werden (vgl. Box 1.3 zu Abschätzungen der Kosten des Klimawandels). Es ist allerdings sehr wahrscheinlich, dass diese global aufsummierten Zahlen die tatsächlichen Kosten der Schäden um den Faktor 2 bis 3 unterschätzen, da sie viele nicht quantifizierbare Auswirkungen beinhalten (Parry et al., 2007, 2009).

Dem stehen von 1992 bis 2010 kumulierte finanzielle Unterstützungen für Anpassung in Entwicklungsländern durch Industriestaaten unter der UNFCCC im Ausmaß von weniger als einer Mrd. $ gegenüber. Bei den Mitteln handelt es sich um freiwillige Zahlungen / Leistungen, meist im Rahmen der Entwicklungszusammenarbeit sowie in Form von Transaktionsgebühren aus dem Clean Development Mechanismus. Zum Vergleich: eine Zusammenstellung der im Jahr 2008 vorliegenden 385 Projekte zur Umsetzung der NAPAs wies Finanzierungserfordernisse in Höhe von ca. 1,5 Mrd. $ aus.

Ausdruck des bestehenden Defizits bezüglich Anpassung auf der internationalen Ebene ist u. a. das Bemühen, im Zuge des Arbeitsprogramms „Loss and Damage" der Anpassung an den Klimawandel zusätzliche Impulse zu geben. Das Arbeitsprogramm zu Loss and Damage erkennt die Notwendigkeit an, die internationale Zusammenarbeit und Expertisen zu intensivieren um „Verluste und Schäden bedingt durch die nachteiligen Folgen des Klimawandels, einschließlich jener im Zusammenhang mit extremen Wetterereignissen und jener auf Grund langsamer Änderungen" besser zu verstehen und zu verringern (Entscheidung 7 / CP.17, UNFCCC, 2011b). Dieses Arbeitsprogramm trägt dem Umstand Rechnung, dass letztlich trotz Emissionsminderung und Anpassung ökonomische Verluste in besonders verletzlichen Gebieten unvermeidbar sind bzw. sein werden. Als alternativer Ausweg für die betroffene Bevölkerung verbleibt in der Regel nur mehr die Migration in Gebiete mit besseren Lebensbedingungen.[8] Entsprechende erste Beschlüsse zu diesem Thema werden 2013 erwartet.

Finanzielle Unterstützung durch Österreich

Gemäß dem Fünften Nationalen Klimaberichts (UNFCCC, 2010a) hat Österreich von 2005 bis 2008 Beiträge in der Höhe von rund 30 Mio. $ zur Global Environment Facility (GEF) geleistet und auch ein Teil (etwa 10 %) der Entwicklungshilfe (2008: 1.681 Mio. $) erreichte die LDCs, wobei der Fünfte Nationale Klimabericht keine Auskunft darüber gibt, welcher Anteil zur Finanzierung von Anpassungsmaßnahmen diente. Der Beitrag Österreichs zum sogenannten Fast Start Funding der EU (2010 bis 2012 für die EU: 7,14 Mrd. €) betrug 40 Mio. € pro Jahr (BMLFUW, 2014); davon entfielen auf Anpassung etwa 30 %.

Die Erstellung einer transparenten und nachvollziehbaren sowie für alle Staaten vergleichbaren Statistik der Geldflüsse ist jedoch bis jetzt mangels einer Einigung auf internationaler Ebene bezüglich entsprechender Berichtsformate nicht möglich. Anzustreben wäre ein Berichtsformat welches nicht nur Auskunft über die Finanzflüsse gibt sondern auch über die damit geförderten Projekte. Auf diese Art und Weise können am ehesten Doppelzählungen vermieden sowie Unterschiede in der Sichtweise zwischen Empfänger- und Geberländern geklärt werden.

Das Bemühen Österreichs, die Klimapolitik in Entwicklungsländern zu unterstützen, kommt im Rahmen des Strategischen Leitfadens Umwelt & Entwicklung (BMEIA, 2009) deutlich zum Ausdruck. Neben dem GEF und bilateraler Entwicklungshilfe nutzt Österreich in zunehmenden Maße auch andere Kanäle, wie den International Fund for Agricultural Development (IFAD), CGIAR-Fonds, IFIs, das Außenwirtschaftsprogramm sowie die Österreichische Entwicklungsbank (OeEB), zur Bereitstellung von Hilfe.

Bis Ende 2012 wurden keine Planungen öffentlich bekannt, in welchem Umfang und auf welche Art und Weise sich Österreich an der Finanzierung der im Rahmen der Cancun-Vereinbarung von den Industriestaaten zugesagten Mittel von 100 Mrd. $ jährlich ab 2020 zu beteiligen beabsichtigt. Im Gegensatz dazu sagten Staaten wie Deutschland und Großbritannien in Doha zusätzliche finanzielle Mittel für die Zeit zwischen 2012 und 2020 zu.

[8] Vergleiche dazu auch das Side Event auf der COP 18 in Doha, auf dem die International Organization for Migration (IOM) die Berücksichtigung von Migration seitens vulnerabler Länder in NAPs sowie des Loss and Damage Programs anhand konkreter Beispiele thematisierte.

Box 1.3: Die Schadenskosten des Klimawandels
Box 1.3: The social costs of carbon

Bei der Implementierung von Klimaschutz- und Anpassungsmaßnahmen spielen Kostenüberlegungen eine große Rolle. Dementsprechend sind die Schadenskosten des Klimawandels, gemessen in Geldeinheiten, ein wichtiger Maßstab bei der Bewertung von THG-Emissionsreduktionen. THG-Schadenskosten (Social Costs of Carbon, SCC) sind der Gegenwartswert der Klimafolgeschäden, den eine heute emittierte Einheit eines THG (Tonne CO_2-Äquivalent) verursacht; sie können also als Kosten des Nichthandelns interpretiert werden. Anhand von Schadenskosten kann auch der Wert von Ökosystemleistungen, wie etwa der Kohlenstoffsequestrierung, abgeschätzt werden.
Aufgrund variierender Annahmen (z. B. Zeithorizont, Diskontrate, regionale Schadensverteilung, zugrunde gelegtes Emissionsszenario mitsamt der unterschiedlichen Annahmen hinsichtlich der zukünftigen sozioökonomischen Entwicklung) schwanken die Ergebnisse innerhalb einer großen Bandbreite zwischen etwa 14 und 300 € / t CO_2-Äq. (Downing et al., 2005; Tol, 2005). Die Annahme hoher Diskontraten, die weiter in der Zukunft liegende Schäden finanziell stark abwerten, führen dabei zu niedrigen Kosten, sind aber aus ethischen und aus methodischen Gründen umstritten (Gardiner, 2011). Weiters steigen die Schätzwerte der Schadenskosten über die Zeit, da anzunehmen ist, dass zukünftige Emissionen mit höheren zusätzlichen Schäden verbunden sind (Interagency Working Group on Social Costs of Carbon, US Government, 2010). Die Regierung der Vereinigten Staaten verwendet auf Grundlage einer langjährigen Studie (Greenstone et al., 2011) zur Abschätzung der Auswirkungen von nationalen Gesetzen mittels Kosten / Nutzen Analyse einen zentralen Wert der SCC (bei einer Diskontrate von 3 %) für das Jahr 2010 von 21 $ je Tonne CO_2-Emissionen und für Sensitivitätsanalysen werden die Werte von 5 $, 35 $ und 65 $ (jeweils bezogen auf die Kaufkraft des Dollars im Jahr 2007) benutzt. Im Mai 2013 wurde der zentrale Schätzwert für 2013 der SCC um 60 % von 22,8 $ auf 36 $ je Tonne CO_2 angehoben (Interagency Working Group on Social Costs of Carbon, US Government, 2010, 2013), was deutliche Auswirkungen auf die Beurteilung von klimapolitischen Regelungen haben dürfte.
Auf Grundlage zahlreicher Studien empfiehlt das deutsche UBA (2007), einen Schätzwert von 70 € / t CO_2-Äq. als marginale Schadenskosten für die Berechnung öffentlicher Investitionen zu verwenden. Stern (2007) kommt bei seiner Analyse der marginalen Schadenskosten bei einer Business-as-usual-Entwicklung mit 85 € / t CO_2-Äq. zu ähnlichen Ergebnissen. Die deutlich höheren Werte der THG-Schadenskosten im Vergleich zu Zertifikatspreisen für Verschmutzungsrechte im europäischen Emissionshandel weisen darauf hin, dass die Preisbildung durch den Zertifikathandel bislang die Klimaauswirkungen von THG-Emissionen nur ungenügend abbildet.

1.2.1 Anpassung aus europäischer Sicht

Von der Notwendigkeit Anpassungsmaßnahmen zu setzen sind unterschiedlichste politische Ebenen – von der internationalen, über die europäische bis hin zur nationalen und lokalen – betroffen. Seit 2005 ist auf europäischer Ebene das Thema Anpassung an den Klimawandel präsent und wurde in die Fortschreibung des Europäischen Klimaänderungsprogramms (Second European Climate Change Programme, ECCP II) integriert (vgl. Tabelle 1.6).

Die Europäische Kommission (EK) hat mit dem Grün- und dem Weißbuch zur Anpassung (EK 2007, EK 2009a) erste Schritte gesetzt, um die Widerstandskraft der EU gegenüber dem Klimawandel zu erhöhen. Diese beiden Dokumente können als erste Schritte zur Anpassung Europas an den Klimawandel gesehen werden, vor allem für jene Bereiche, in denen die EK rahmengebende und koordinierende Funktionen übernimmt (z. B. Landwirtschaft, Gesundheit). Weiters konzentrieren sich die Aktivitäten auf eine verstärkte Vernetzung der Mitgliedstaaten.

Im Grünbuch zur Anpassung (EK, 2007) legte die EK fest, dass sie sich gemeinsam mit den Mitgliedstaaten und auf globaler Ebene mit den Partnerländern den Anpassungsherausforderungen stellen muss. Ein europäisches Konzept wird als notwendig erachtet, um eine ordnungsgemäße Koordination zu gewährleisten und sicherzustellen, dass die politischen Maßnahmen zur Bekämpfung der Klimawandelauswirkungen wirksam sind. Dabei wird betont, dass Anpassungsmaßnahmen mit den Maßnahmen zum Klimaschutz in Einklang stehen müssen und umgekehrt.

Tabelle 1.6 Politische Meilensteine zur Anpassung auf europäischer Ebene
Table 1.6 Political milestones to adaptation at the European scale

Datum	Meilenstein	Beschreibung
2005	Europäisches Programm zur Klimaänderung (ECCP)	integriert Anpassung und legt fest, dass eine Arbeitsgruppe zur Anpassung (Working Group II „Impacts and Adaptation") eingerichtet wird
Juni 2007	Grünbuch zur Anpassung (EK, 2007)	legt Basis für Anpassungsinitiativen auf EU-Ebene
April 2009	Weißbuch zur Anpassung (EK, 2009)	gibt einen Aktionsrahmen vor, innerhalb dessen sich die Europäische Union und ihre Mitgliedstaaten auf die Folgen des Klimawandels vorbereiten sollen
April 2013	EU Anpassungsstrategie (EK, 2013)	zielt auf eine Stärkung der Klimaresilienz in Europa ab

Während das Grünbuch die Notwendigkeit der Anpassung auf Europäischer Ebene argumentiert, präsentiert das Weißbuch zur Anpassung (EK, 2009a) bereits einen Aktionsrahmen, innerhalb dessen sich die EU und ihre Mitgliedstaaten auf die Folgen des Klimawandels vorbereiten sollen. Weiters stellt das Dokument dar, wie die EU und ihre Mitgliedstaaten vom Klimawandel betroffen sind. Das Weißbuch stellt zudem fest, dass sich die Auswirkungen des Klimawandels schneller und stärker bemerkbar machen, als der Weltklimarat in seinem Bericht von 2007 feststellt.

Grundsätzlich geht das Weißbuch davon aus, dass die Auswirkungen des Klimawandels in verschiedenen Regionen unterschiedlich ausfallen und viele Anpassungsmaßnahmen auf nationaler, regionaler oder gar lokaler Ebene getroffen werden. Die Kommission möchte mit dem Weißbuch die bestehenden Aktivitäten der Mitgliedstaaten stärken und durch koordinierte Maßnahmen auf EU-Ebene unterstützen (z. B. durch Koordinierung und Austausch bewährter Methoden). Die EU sieht ihre Rolle besonders dort, wo die Folgen des Klimawandels die Grenzen einzelner Länder überschreiten – etwa bei Flusseinzugsgebieten oder bei zusammenhängenden Naturräumen wie den Alpen.

Das übergreifende Ziel des EU-Anpassungsrahmens ist es, die Widerstandskraft der EU gegenüber dem Klimawandel zu verbessern. Das Weißbuch präsentiert einige Aktionsschwerpunkte für die erste Phase der Umsetzung in den Jahren 2009 bis 2012:

- Schaffung einer soliden Wissensgrundlage (z. B. Entwicklung von Methoden, Modellen, Indikatoren zur besseren Überwachung der Auswirkungen, Bewertung der Kosten / Nutzen von Anpassungsoptionen);
- Einbeziehung des Aspekts der Anpassung in die verschiedenen Politikbereiche auf EU-Ebene (Gesundheit und Soziales, Land- und Forstwirtschaft, Biodiversität, Küsten und Meere, Produktionssysteme und Infrastruktur);
- Entwicklung von Finanzierungsmechanismen (z. B. Schätzung der Anpassungskosten, Möglichkeiten von Versicherungen), Intensivierung der nationalen (z. B. Einrichtung einer Lenkungsgruppe – Impact and Adaptation Steering Group IASG) und internationalen Zusammenarbeit, sowie vor allem Bereitstellung von Wissen für Entwicklungsländer.

Im Weißbuch legt die Kommission fest, dass jene Anpassungsmaßnahmen Vorrang erhalten sollen, die ungeachtet der Unsicherheit künftiger Prognosen soziale und / oder wirtschaftliche Nettovorteile erbringen (No-regret-Maßnahmen). Priorität soll auch Maßnahmen eingeräumt werden, die sowohl unter Klimaschutz-, als auch unter Anpassungsgesichtspunkten von Vorteil sind.

Mit der Umsetzung des Weißbuchs wurde im März 2012 die Internet-Plattform für Klimawandelanpassung – CLIMATE-ADAPT (European Climate Adaptation Plattform)[9] der Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Damit stehen den NutzerInnen Informationen zu folgenden Bereichen zur Verfügung:

- Szenarien für den Klimawandel in Europa;
- Klimawandelbedingte Anfälligkeit der Regionen, Länder und Sektoren;
- Informationen über nationale, regionale und transnationale Anpassungsaktivitäten und -strategien;
- Fallstudien zu Anpassungsmaßnahmen und mögliche weitere Anpassungsoptionen;
- Webtools zur Unterstützung des Anpassungsprozesses;
- Informationen über das Mainstreaming auf europäischer Ebene;
- Steckbriefe zu anpassungsbezogenen Forschungsprojekten, Leitliniendokumente (z. B. zum Umgang mit Unsicherheiten), Berichte, weiterführende Informationsquellen sowie Links und Veranstaltungen.

[9] http://climate-adapt.eea.europa.eu/

Als weiterer Schwerpunkt soll Anpassung in alle betroffenen EU-Politikbereiche einfließen. U.a. wurde dafür ein Leitfaden zur Integration anpassungsrelevanter Aspekte bei der Erstellung der Nationalen Gewässerbewirtschaftungspläne veröffentlicht (EK, 2009b). In der von der Europäischen Kommission beauftragten Studie „Climate Proofing für Schlüsselbereiche der EU-Politik"[10] wurden Vorschläge für die Anpassung bestehender Instrumente in den Bereichen Energie, Verkehr, Landwirtschaft und urbane Räume ausgearbeitet, sowie eine Reihe konkreter Maßnahmen vorgeschlagen. Ferner unterstützt die EU z.B. die Entwicklung regionaler und lokaler Anpassungsstrategien durch Leitlinien[11], die im Jahr 2009 vorgestellt wurden.

In der 1. Phase wurden über 30 Aktionen gestartet mit dem Ziel, eine Entscheidungsgrundlage über die Risiken und Folgen des Klimawandels zu schaffen, mögliche Adaptionsstrategien zu analysieren sowie Informationen zu Anpassungsmaßnahmen auszutauschen. Dieses Wissen mündete in eine umfassende Anpassungsstrategie der EU, die am 16. April 2013 vorgestellt wurde.

Die EU Strategie zur Anpassung an den Klimawandel schlägt Maßnahmen zur Vorsorge und Stärkung des Reaktionsvermögens gegenüber aktuellen und künftigen Auswirkungen des Klimawandels auf lokaler, regionaler, nationaler und EU-Ebene vor. Dabei legt die Strategie ihren Fokus auf folgende Aspekte:

- Förderung von Anpassungsaktivitäten in den EU-Mitgliedstaaten: Alle EU-Mitgliedstaaten sollen umfassende Nationale Anpassungsstrategien erstellen (15 liegen derzeit vor, darunter auch jene Österreichs). Die Kommission sieht vor, Anpassungsaktivitäten auch finanziell zu unterstützen. Klimawandelanpassung in europäischen Städten wird als weiterer Schwerpunkt von der Kommission in den kommenden Jahren verfolgt.
- Integration von Klimawandelaspekten auf EU-Ebene in den Schlüsselsektoren Landwirtschaft, Fischerei, Kohäsionspolitik und Infrastruktur sowie forcierte Anwendung von Versicherungen in der Risikovorsorge.
- Besser fundierte Entscheidungsfindung in der Maßnahmensetzung zur Klimawandelanpassung durch Adressierung von Wissenslücken und Weiterentwicklung der europäischen Wissensplattform Climate-ADAPT.

[10] http://www.ecologic.eu/de/4827

[11] http://ec.europa.eu/clima/policies/adaptation/docs/ras_final_report_en.pdf

Ein besserer Zugang zu Finanzmitteln ist für die Umsetzung der Ziele der EU-Strategie zur Anpassung an den Klimawandel wesentlich. Im Entwurf des mehrjährigen Finanzierungsrahmens für 2014 bis 2020 wird so vorgeschlagen, die Ausgaben im Zusammenhang mit dem Klimaschutz und der Anpassung auf mindestens 20 % des EU-Haushalts anzuheben. Die Europäischen Struktur- und Investitionsfonds sowie die Programme Horizont 2020 und LIFE werden die Mitgliedstaaten, Regionen und Städte wesentlich bei der Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen unterstützen.

Bis zur Neugründung der Generaldirektion Climate Action (DG CLIMA) im Jahre 2010 wurden die Klimawandelagenden (z.B. Grünbuch, Weißbuch) von der Generaldirektion Umwelt (DG ENV) wahrgenommen. Nun führt die DG CLIMA die internationalen Verhandlungen im Bereich Klimaschutz (rund 150 MitarbeiterInnen) und betreut den Bereich der Anpassung an den Klimawandel (rund 10 MitarbeiterInnen).

Seit 1994 wird die EK (und weitere Organe der Europäischen Union) mit unabhängigen Informationen durch die Europäische Umweltagentur mit Sitz in Kopenhagen unterstützt. Außer den Einrichtungen der EU zählen 32 europäische Länder zu den Hauptkunden der Agentur. Eine Gruppe von sechs Personen arbeitet innerhalb der Agentur zu Vulnerabilität und Anpassung. Bis dato wurden zahlreiche Syntheseberichte zu Auswirkungen, Vulnerabilitäten, Anpassungsoptionen[12] usw. veröffentlicht.

Erste wissenschaftliche Ergebnisse zu Klimawandelauswirkungen auf europäischer Ebene liegen im Rahmen von Projekten, welche durch Mittel der europäischen Forschungsrahmenprogramme (FP) ab dem Jahr 2004 finanziert wurden, vor (z.B. FP5 finanziertes Projekt ATEAM[13]). Im Sechsten Rahmenprogramm 2002 bis 2006 lag einer der Forschungsschwerpunkte auf dem Klimawandel (gemeinsam mit nachhaltiger Entwicklung; dotiert mit 2,12 Mrd. €). Klimawandel ist auch im FP7 (2007 bis 2013) zentrales Thema, da dieses nur in einer europäischen und internationalen Kooperation sinnvoll untersucht werden kann. Eine Publikation der Generaldirektion Forschung und Entwicklung (DG RDT) aus 2010 fasst die Klimawandel-relevanten Forschungsprojekte aus FP6 und FP7 zusammen (EK, 2010). Einige der genannten Projekte haben dabei eine direkte Relevanz für die Europäische Politik im Bereich der Anpassung (z.B. ADAM[14], CLIMATEWATER[15]).

[12] http://www.eea.europa.eu/de/themes/climate/eea-activities

[13] http://www.pik-potsdam.de/ateam/

[14] http://www.tyndall.ac.uk/adamproject/about

[15] http://www.climatewater.org/

Neben den Forschungsrahmenprogrammen werden auch im Rahmen des Europäischen INTERREG Programms Forschungsgelder für Klimawandelbezogene Forschungsfragen ausgeschüttet. So werden z. B. die für den Alpenraum vorliegenden Projektergebnisse nun im laufenden C3-Alps Projekt[16] (finanziert durch das INTERREG Alpine Space Programm) synthetisiert und kommuniziert. Das Ziel ist auch hier, die Forschungsergebnisse so aufzubereiten, dass sie in politische Entscheidungsprozesse integriert werden können.

Europäische Aktivitäten auf politischer Ebene, aber auch neues Wissen aus der Forschung haben eine Vielzahl von europäischen Staaten dazu veranlasst, an der Erstellung von nationalen Strategien zur Anpassung an das veränderte Klima zu arbeiten. Großbritannien hat mit der Einrichtung des UKCIP (United Kingdom Climate Impact Programme) im Jahr 1998 eine europäische Vorreiterrolle in der Anpassung übernommen.

Als erstes europäisches Land hat Finnland 2005 eine „National Adaption Strategy" (NAS) verabschiedet.[17] Die Strategien schaffen einen – politisch zumeist wenig verbindlichen (Ausnahme: Großbritannien mit dem Climate Change Act, 2008) – Rahmen, der die notwendige Anpassung auf allen Entscheidungsebenen, von national bis lokal, unterstützt. Neben Finnland haben bis 2013 15 weitere europäische Länder eine Anpassungsstrategie verabschiedet (Belgien 2010, Dänemark 2008, Deutschland 2008, Frankreich 2007, Irland 2013, Litauen 2013, Malta 2012, Niederlande 2007, Norwegen 2008, Österreich 2012, Portugal 2010, Schweiz 2012, Spanien 2006, Ungarn 2008, UK 2008 / 2013).

Auf dem Weg zur NAS werden in vielen Ländern auch weitere StakeholderInnen (wie z. B. Interessenvertretungen und NGOs) mittels Konferenzen und Workshops (z. B. in Portugal, Finnland), Konsultationen (z. B. in Spanien, Dänemark), Partnerschaften (z. B. in Norwegen, Deutschland), mittels Internetbefragungen (z. B. in Ungarn, Deutschland) und dergleichen miteinbezogen (Bauer et al., 2012; Biesbroek et al., 2011). Die Ergebnisse aus der StakeholderInnen-Beteiligung liefern zwar einen erheblichen Beitrag zur Erstellung der Strategie, die finale Entscheidung wird aber in allen Ländern von den jeweils politisch Verantwortlichen getroffen.

Nachdem die vorliegenden Strategien als Rahmenwerk für die Anpassung auf nationaler Ebene mehrheitlich dem Charakter von Leitlinien entsprechen, wurde nach ihrer Veröffentlichung eine Reihe von Aktivitäten zur Umsetzung gestartet.

16 http://www.c3alps.eu/index.php/de/

17 http://www.klimawandelanpassung.at/apps/glossar/?tx_a21glossary%5Buid%5D=35&tx_a21glossary%5Bback%5D=4302&cHash=b279d0e59a

Für sieben Staaten liegen „Aktionspläne" (z. B. Frankreich, Deutschland, Österreich) vor, mit dem Ziel, Anpassungsmaßnahmen zu konkretisieren und / oder für die Ebene der Bundesländer und Regionen aufzubereiten.

In Deutschland wird als wesentlicher Teil des Aktionsplans an einem kriterienbasierten System für die Priorisierung der Anpassungsoptionen gearbeitet. Auch in den Niederlanden wurden umfangreiche Arbeiten zur methodischen Entwicklung von Priorisierungssystemen für Anpassungsmaßnahmen durchgeführt (Routeplanner; Klimaat en Ruimte, 2007).

Im Zuge der Umsetzung der Strategien haben einige Staaten umfangreiche Informationsportale (z. B. UKCIP in Großbritannien[18] oder das Adaptation Portal in Dänemark[19]) erstellt. Zusätzlich stellen manche Länder Onlinetools zur Anpassung zur Verfügung (z. B. Deutschland[20], Großbritannien[21], Norwegen[22]), welche Organisationen dabei unterstützen sollen, sich systematisch mit den Klimawandelfolgen und der notwendigen Anpassung auseinanderzusetzen.

Monitoring und Erfolgskontrolle sind als Teil des schrittweisen Anpassungsprozesses wesentlich für die Bewertung der Wirksamkeit von Strategien und der darin enthaltenen Maßnahmen. Obwohl viele Strategien die Bedeutung der Erfolgskontrolle hervorheben (z. B. Schweden, Niederlande, Dänemark, Spanien), haben sich bis dato nur einzelne Staaten (z. B. Großbritannien, Finnland, Deutschland, Österreich) mit dieser Frage vertiefend auseinandergesetzt.

In Finnland wurde 2009 – vier Jahre nach der Verabschiedung der Strategie – eine erste Evaluierung veröffentlicht. Darin wurden die Maßnahmen aus der Strategie anhand einer fünfskaligen Tabelle bewertet (von 1 [wenige Aktivitäten] bis zu 5 [Maßnahme umgesetzt]). Um den Fortschritt Deutschlands bei der Anpassung bewerten zu können, wurden erste Vorschläge für Indikatorensysteme erarbeitet. Aktuell wird an der Konkretisierung eines solchen Systems für die Erfolgskontrolle gearbeitet.

Die Strategie Großbritanniens („Climate Change Bill") legt ein rechtlich verbindliches Monitoring und Reporting zu den Risiken des Klimawandels und zu den Anpassungserfolgen fest. Für diese Aufgabe wurde eine Arbeitsgruppe (Adaptation Sub-Committee) etabliert, die laufend Assessment-Berichte[23]

18 http://www.ukcip.org.uk/

19 http://www.klimatilpasning.dk/en-us/Sider/ClimateChangeAdaptation.aspx

20 http://www.klimalotse.anpassung.net/klimalotse/DE/02_Intensivdurchlauf/0_home/home_node.html

21 http://www.ukcip.org.uk/tools/

22 http://www.regjeringen.no/en/dep/md/kampanjer/engelsk-forside-for-klimatilpasning/library/guide.html?id=539988

23 http://www.theccc.org.uk/reports/adaptation

Tabelle 1.7 Sektorale Abdeckung der Studien zur Ermittlung von Anpassungskosten in Europa. Quelle: Watkiss and Hunt (2010), eigene Übersetzung

Table 1.7 Sectoral coverage of studies on adaptation cost assessments in Europe. Source: Watkiss and Hunt (2010)

Sektor / Bereich	Abdeckung	Kosten-schätzungen	Nutzen-schätzungen
Küstengebiete	Sehr hohe Abdeckung für Europa insgesamt, einzelne Regionen, einige Mitgliedstaaten sowie Städte / Gemeinden	✓✓✓	✓✓✓
Energie	Mittel. Kühl- und Heizbedarf (autonome Anpassung) für Europa insgesamt, einige Mitgliedstaaten. Geringer für geplante Anpassung und Erzeugung	✓✓	✓✓
Infrastruktur	Mittel. Schätzungen von Anpassungskosten in einigen Ländern für Überflutungen, aber geringere Abdeckung von anderen Risiken für Infrastruktur	✓✓	✓
Landwirtschaft	Hohe Abdeckung von Nutzen aus Anpassung auf der Ebene landwirtschaftlicher Betriebe, aber viel geringere Abdeckung von Kosten sowie geplanter Anpassung	✓	✓✓
Gesundheit	Niedrig bis mittel. Anpassungskosten für Hitzevorwarnsysteme sowie Lebensmittelinfektionen, geringere Abdeckung durch andere Gesundheitsrisiken	✓	
Wasser	Niedrig bis mittel. Begrenzte Anzahl von Studien zu Wasserverfügbarkeit auf nationaler oder regionaler Ebene bzw. für spezifische Flusseinzugsgebiete	✓	
Verkehr	Niedrig bis mittel. Einige nationale Studien sowie Fallstudien für einzelne Sektoren	✓	
Tourismus	Niedrig. Studien für Wintertourismus (Alpen) und einige Studien für autonome Anpassung durch veränderte Tourismusströme im Sommer	✓	✓
Forstwirtschaft und Fischerei	Niedrig. Begrenzte Anzahl quantitativer Studien	✓	
Biodiversität	Niedrig. Begrenzte Anzahl quantitativer Studien	✓	
Industrie und Gewerbe	Sehr niedrig. Keine quantitativen Studien gefunden		
Anpassungskapazität	Niedrig. Einige wenige Studien, die sich auf qualitative Beschreibung des Nutzens beschränken	✓	

veröffentlicht. Ein Indikatorensystem für die Erfolgskontrolle soll 2012 vorliegen.

Aus Sicht Österreichs stellt das europäische Rahmenwerk eine wichtige Grundlage für die Planung und Umsetzung von Klimawandelanpassung in Österreich dar. Zudem können einige Best-Practice-Erfahrungen aus anderen Mitgliedstaaten, allen voran aus Großbritannien, Finnland und Deutschland, auf Österreich übertragen werden: für die Auswahl, Planung und Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen stellen zielgruppenorientierte Informationsangebote eine hilfreiche Unterstützung dar. Monitoring- und Reportingverpflichtungen erhöhen den Anreiz zur Umsetzung von Klimawandelanpassungsstrategien. Auf den konkreten Stand der Umsetzung der Klimawandelanpassung in Österreich wird in Abschnitt 1.2.2 eingegangen.

Kosten und Nutzen von Anpassung

Studien zu den Kosten des Klimawandels sowie zu den Kosten von Anpassung liegen für Europa nur vereinzelt vor.

Die Ergebnisse des Peseta-Projekts (Projection of Economic impacts of climate change in Sectors of the European Union based on bottom-up Analysis)[24] geben einen Einblick in die zu erwartenden Kosten aufgrund des Klimawandels in Europa für das Jahr 2080. Das Ergebnis zeigt, dass die Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft, auf Flüsse, Küstenbereiche, Tourismus und Gesundheit – die in Europa ohne Maßnahmen zur Anpassung zu erwarten sind – Kosten zwischen 20 Mrd. € (unter einem Szenario mit einer globalen Erwärmung von 2,5 °C) und 65 Mrd. € (unter einem Szenario mit einer globalen Erwärmung von 5,4 °C und starkem Anstieg des Meeresspiegels) verursachen werden (Ciscar et al., 2011).

Studien zu den Anpassungskosten in Europa können aufgeteilt werden in paneuropäische, sektorale, und nationale Studien. Es herrscht methodologischer Pluralismus und die empirische Evidenz ist fragmentiert. Wie Tabelle 1.7 für die sektoralen Studien zeigt, ist die Erhebung der Anpassungskosten (und Nutzen) bisher nur unvollständig durchgeführt worden, wobei die Abdeckung je nach Sektor stark variiert. In zunehmendem Maße wird die empirische Evidenz erweitert, wobei hier oft „graue“ Literatur wichtige Beiträge liefert (Watkiss und Hunt, 2010).

24 http://peseta.jrc.ec.europa.eu/

Tabelle 1.8 Vergleich der Ergebnisse verschiedener Studien zu Anpassungskosten in Europa
Table 1.8 Comparision of different studies on adaptation costs in Europe

Art der Studie und Quelle	Geschätzte Kosten	Zeitraum	Abdeckung
Globale Studien mittels Integrated Assessment Modellen			
UNFCCC (2007b)	3 bis 19 Mrd. $ / Jahr	2030	Infrastruktur und Küstengebiete
Stern (2007)	4 bis 60 Mrd. € / Jahr	2030	Infrastruktur
PAGE (Hope, 2009)	25 bis 60 Mrd. $ / Jahr	2030	EU15
Aaheim et al. (2012)	5 bzw. 35 Mrd. $	2020 bzw. 2050	Westeuropa
Sektorale Studien			
Ciscar et al., 2011 (PESETA project)	0,25 bis 1 Mrd. € / Jahr	2010–2040	Küstengebiete
	0,3 bis 2,6 Mrd. € / Jahr	2070–2100	Küstengebiete
Ebi (2008); Markandya et al. (2009)	12 bis 260 Mio. $ / Jahr	bis 2030	Gesundheit
Nationale Studien			
Großbritannien (Evans et al., 2004; Hall et al., 2005)	Bis zu 1 Mrd. € / Jahr	bis 2100	Kosten zur Bekämpfung von Überschwemmung an Küsten, Flüssen und innerhalb von Städten
Niederlande (Delta Comission, 2008)	1,2 bis 1,6 Mrd. € / Jahr	bis 2050	Überflutungsschutz und Risikomanagement
	0,9 bis 1,5 Mrd. € / Jahr	2050–2100	Überflutungsschutz und Risikomanagement
Schweden (Swedish Commission on Climate and Vulnerability, 2007)	in Summe bis zu 10 Mrd. €	für die Periode 2010–2100	Multi-sektoral

Die Studien verwenden eine Vielzahl von Methoden und Metriken und beziehen sich auf unterschiedliche Zeitperioden und Sektoren, was die Vergleichbarkeit der Ergebnisse erschwert. Tabelle 1.8 fasst Ergebnisse für drei Arten von Studien zusammen.

1.2.2 Anpassung aus österreichischer Sicht

Implikationen internationaler und europäischer Zielsetzungen für Österreich

Für Österreich ergibt sich ein notwendiger Handlungsbedarf, welcher durch internationale aber auch europäische Verträge / Ziele vorgegeben ist wobei die Umsetzung durch extreme Wetterereignisse mit starken Auswirkungen gefördert wird. Die wichtigsten Eckpfeiler der österreichischen Anpassungsstrategie sind in Box 1.4 zusammengefasst.

Auf internationaler Ebene sei hier etwa das von Österreich bereits ratifizierte Klimarahmenübereinkommen der Vereinten Nationen (UNFCCC, 2007a) genannt. Darin ist vorgesehen, dass nationale und gegebenenfalls regionale Programme erarbeitet, umgesetzt und aktualisiert werden, die eine angemessene Anpassung an die Klimaänderungen erleichtern. Bezüglich konkreter Anpassungsmaßnahmen sei auf internationaler Ebene das Nairobi Work Programme der UNFCCC erwähnt, welches zu einem besseren Verständnis über Auswirkungen der Klimaänderung und Anpassungsmöglichkeiten beiträgt, indem es Wissen und Erfahrungen einzelner Länder mit der Planung und Durchführung von Anpassungsmaßnahmen vereint (BMLFUW, 2012a).

Aktivitäten auf Europäischer Ebene, wie das Grünbuch und das Weißbuch zur Anpassung, beeinflussten den österreichischen Anpassungsprozess. Ferner war Österreich in verschiedenen Gremien (z. B. Steering Group, Working Group on Knowledge Base on Climate Change Impacts, Vulnerability and Adaptation) vertreten, die vor allem zur Umsetzung des Weißbuchs und zur Erstellung der EU-Anpassungsstrategie etabliert wurden.

Für den Alpenraum gilt die Alpenkonvention (BGBl. Nr. 477/1995), wobei die Vertragspartner im Jahr 2009 den Aktionsplan zum Klimawandel in den Alpen angenommen haben. Dieser Aktionsplan zum Klimawandel zielt darauf ab, die Alpen zu einer Vorbildregion für die Prävention und die Anpassung an den Klimawandel zu machen. Die Alpenstaaten verpflichten sich, die Umsetzung des Klimaaktionsplans durch konkrete Maßnahmen zum Kampf gegen den Klimawandel zu verfolgen und die erforderlichen Mittel hierfür bereitzustellen.

Box 1.4: Eckpfeiler der österreichischen Anpassungsstrategie (Quelle: BMLFUW, 2012a)
Box 1.4: Key elements of the Austrian national adaptation strategy (Source: BMLFUW, 2012a)

Zielsetzung	· Vermeidung nachteiliger Auswirkungen und Nutzung von Chancen · Stärkung natürlicher, gesellschaftlicher und technischer Anpassungskapazität · Keine sozialen Nachteile · Risikominimierung für Demokratie, Gesundheit, Sicherheit und Soziales · partnerschaftliche Kooperation von AkteurInnen · Konflikte zwischen Handlungsfeldern vermeiden · Fehlanpassungen vermeiden
Vorarbeiten	· Klimaszenarien und erste Vulnerabilitätsabschätzungen
Leitprinzipien	· Verantwortung wahrnehmen, Information weitergeben, Kooperation fördern · Unsicherheiten mitdenken · Klimafolgen priorisieren · Breites Spektrum an Anpassungsmöglichkeiten nutzen · Anpassungsmaßnahmen priorisieren · In bestehende Instrumente und Strukturen integrieren · Ziel- und Nutzungskonflikte vermeiden · System für Monitoring und Evaluierung schaffen
Kriterien für die Priorisierung	· Bedeutung / Relevanz · Dringlichkeit · Robustheit · Flexibilität bzw. Reversibilität · Kosten-Nutzen-Relation · Positive Nebeneffekte · Simultane Klimaschutzwirkung · Wechselwirkungen zu anderen Handlungsempfehlungen
Kategorien von Anpassungsmaßnahmen	· „graue", rein technische Maßnahmen · „grüne" Maßnahmen, die darauf abzielen, die natürlichen Funktionen von Ökosystemen zu erhalten oder zu verbessern und somit „Resilienzen" zu schaffen, die Klimafolgen puffern können · „softe oder smarte" Maßnahmen. Darunter sind Aktivitäten zusammengefasst, die auf eine Bewusstseinsstei gerung und auf Wissenszuwachs fokussieren, ökonomische Anreize schaffen und institutionelle Rahmenbedingungen für die Anpassung ermöglichen
Handlungsfelder	· Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Wasserwirtschaft, Tourismus, Energie, Schutz vor Naturgefahren, Bauen und Wohnen, Ökosysteme, Gesundheit, Verkehrsinfrastruktur · Katastrophenmanagement, urbane Frei- und Grünräume · Soziale Fragen, Raumordnung, Wirtschaft

Der Prozess zur Entwicklung der österreichischen Anpassungsstrategie begann 2007. Die Meilensteine finden sich in Tabelle 1.9.

Das Lebensministerium (BMLFUW) organisierte im Zeitraum September 2007 bis November 2011 sechs Informationsveranstaltungen. Bei diesen informellen Workshops wurde der aktuelle Stand der inhaltlichen Arbeiten einem breiten Publikum vorgestellt und diskutiert.

Die Österreichische Strategie zur Anpassung an den Klimawandel liegt seit Frühjahr 2012 vor und wurde im Oktober 2012 im Ministerrat verabschiedet (vgl. Tabelle 1.11 zur Entstehung der Strategie). Die Anpassungsstrategie glie-

Tabelle 1.9 Überblick über die Entwicklung der österreichischen Anpassungsstrategie
Table 1.9 Overview on development of the Austrian national adaptation strategy

Datum	Publikationstyp	Inhalt
März 2008	Studie	Ist-Stand-Erhebung zur Anpassung an den Klimawandel in Österreich
November 2008	Studie Handlungsempfehlungen I	Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Wasserwirtschaft, Tourismus, Energie
Dezember 2009	Policy Paper I	Auf dem Weg zu einer nationalen Anpassungsstrategie (inkludiert Stellungnahme und Beteiligungsprozess)
Oktober 2010	Handlungsempfehlungen II	Schutz vor Naturgefahren, Bauen und Wohnen
Jänner 2011	Handlungsempfehlungen III	Ökosysteme, Gesundheit, Verkehrsinfrastruktur
Oktober 2011	StartClim Projekte und weitere Studien	Empfehlungen aus StartClim Projekten: Katastrophenmanagement, urbane Frei- und Grünräume Empfehlungen aus anderen Projekten: Soziale Fragen, Raumordnung, Wirtschaft
Dezember 2011	Policy Paper II Rahmenwerk	Anpassungsstrategie im Entwurf – Kontext und Aktionsplan (Teil I und II)
Oktober 2012	Anpassungsstrategie	Annahme der österreichischen Strategie zur Anpassung an den Klimawandel im Ministerrat

dert sich in ein strategisches Rahmenwerk („Kontext“) und in einen Aktionsplan. Der Kontext behandelt strategische Grundfragen und erklärt die Einbettung der Strategie in den Gesamtzusammenhang. Im Aktionsplan sind konkrete Handlungsempfehlungen zur Umsetzung in den 14 Aktivitätsfeldern dargestellt.

Bei der Entwicklung der Anpassungsstrategie für Österreich übernahm die Wissenschaft eine wesentliche Rolle: einerseits lieferten wissenschaftliche Ergebnisse einen wichtigen Beitrag für die Bewusstseinsbildung auf politischer Ebene, andererseits bildeten Forschungsergebnisse die inhaltliche Basis der Strategie. Die Klimaforschung in Österreich zeigte in den letzten Jahren eine rege Entwicklung. Auf Ebene des Bundes liefern der Forschungsschwerpunkt „Klimawandel und Anpassung“, das nationale Klimawandelfolgenforschungsprogramm StartClim[25] und der Klima- und Energiefonds[26] (dabei vor allem das Forschungsprogramm Austrian Climate Research Program – ACRP) wichtige und zukunftsweisende Ergebnisse. Des Weiteren konnten durch das Forschungsprogramm proVision[27] des Bundesministeriums für Wissenschaft und Forschung sowie durch das Global Change Programm[28] der Österreichischen Akademie der Wissenschaften weitere wesentliche Erkenntnisse für die Anpassungsstrategie gewonnen werden.

Ziel der österreichischen Anpassungsstrategie ist es, nachteilige Auswirkungen des Klimawandels auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft zu vermeiden und die sich ergebenden Chancen zu nutzen. Die Strategie soll die natürliche, gesellschaftliche und technische Anpassungskapazität stärken. Trotz umfangreicher wissenschaftlicher Erkenntnisse sind die Auswirkungen des Klimawandels in vielen Bereichen mit Unsicherheiten behaftet. Es stand daher bei der Gestaltung der Strategie im Vordergrund, flexible bzw. robuste Handlungsempfehlungen zu entwickeln, die sich mit geringem Aufwand an unterschiedliche Anforderungen anpassen und einen sekundären Nutzen bringen (BMLFUW, 2012a). Die Strategie hält aber auch fest, dass Anpassung als ein dynamischer Prozess zu sehen ist: die Strategie wird zukünftig immer wieder um neueste Erkenntnisse ergänzt und vertieft werden müssen.

Die österreichische Strategie und vor allem der Aktionsplan stellen – auch im Vergleich mit anderen europäischen Ländern – einen umfangreichen Rahmen für die Anpassung dar. Besonders hervor zu heben ist der hohe Detailgrad der Handlungsempfehlungen im Aktionsplan, die neben der Darstellung der Ziele der Maßnahmen und der notwendigen weiteren Schritte, auch Anknüpfungspunkte zu bestehenden Instrumenten (z. B. Bauordnung, ÖPUL, Forstgesetz, EU-Wasserrahmenrichtlinie), HandlungsträgerInnen (Bund, Bundesländer, Gemeinden, Wirtschaftsbetriebe, Interessensvertretungen etc.) und möglichen Konflikten (zwischen Aktivitätsfeldern und Maßnahmen sowie zu anderen politischen Zielen) herstellt.

Die Umsetzung der Strategie und vor allem der Aktionspläne für die 14 Handlungsfelder soll nun in enger Zusammenarbeit zwischen Bund und Ländern unter Beachtung der entsprechenden Zuständigkeiten erfolgen. Da die wissenschaftlich-ökonomische Evaluierung der Konsequenzen des

[25] http://www.austroclim.at/index.php?id=45
[26] http://www.klimafonds.gv.at/
[27] http://www.provision-research.at/
[28] http://www.oeaw.ac.at/deutsch/forschung/programme/change.html

Klimawandels in Österreich („Kosten des Nichthandelns“ und „Schätzung der Anpassungskosten“) noch aussteht, sollen diese Fragen nun im nächsten Schritt bis Ende 2015 im Rahmen eines Forschungsprojektes beleuchtet werden.

Zusätzlich soll der Fortschritt bei der Anpassung regelmäßig evaluiert werden. Dies wird mittels eines Kriterienkatalogs und durch regelmäßige Berichterstattung über die laufenden Aktivitäten in den jeweiligen Aktivitätsfeldern erfolgen. Der erste Bericht zum Stand der Umsetzung kann Ende 2014 erwartet werden.

Alle neun Bundesländer nehmen Klimawandelanpassung als Teil einer integrierten Klimaschutzpolitik wahr. Die Aktivitäten werden in unterschiedlichem Umfang gesetzt und reichen von der Erarbeitung von Grundlagen bzw. Strategien bis hin zur Integration von Aktivitäten in einzelnen Sektoren. In manchen Bundesländern befinden sich länderspezifische Strategien zur Anpassung momentan in Ausarbeitung. Tabelle 1.10 präsentiert einen Überblick über die Aktivitäten zur Anpassung in den einzelnen Bundesländern. Eine detaillierte Darstellung kann im Kontext der Strategie nachgelesen werden (BMLFUW 2012a).

Anpassungsaktivitäten auf regionaler und lokaler Ebene, die auch unter der Überschrift „Klimawandelanpassung“ durchgeführt werden, sind nur sehr vereinzelt zu finden. Die meisten Beispiele wurden im Rahmen von Forschungsprojekten initiiert (z. B. im Waldviertel im Rahmen des ACRP-geförderten Projekts FAMOUS). Jedoch werden vor allem Österreichs Regionen und Gemeinden durch die Auswirkungen des Klimawandels betroffen sein (z. B. Trockenheit, lokale Starkniederschläge, Auftauen des Permafrosts). Daher ergibt sich für diese Ebenen zukünftig auch die Notwendigkeit, in Bereichen wie z. B. Flächenwidmungspläne, Wasserversorgung, Verkehrsinfrastruktur, Katastrophenschutz, für welche diese Ebenen zuständig sind, Klimaschutzaktivitäten regelmäßig an ein sich veränderndes Klima anzupassen.

Tabelle 1.10 Aktivitäten zur Anpassung auf Ebene der österreichischen Bundesländer, Stand August 2013. Quelle: nach BMLFUW (2012a)
Table 1.10 Activities to adaptation by Austrian provinces, as of August 2013. Source: adapted from BMLFUW (2012a)

Bundesland	Laufende Aktivitäten zur Anpassung
Burgenland	Keine umfassende Strategie zur Anpassung vorhanden oder in Ausarbeitung. Befassung in unterschiedlichen Sektoren, wie z. B. Tourismus, Wasserwirtschaft, Energie und Landwirtschaft.
Kärnten	Maßnahmen zur Anpassung werden anlassbezogen und laufend ausgearbeitet, aber nicht im Rahmen eines strategischen Dokuments; Arbeitskreis für Anpassung 2009 gegründet; weitere Schritte zur Anpassung geplant. Teilnahme an Forschungsprojekten wie AdaptAlp, ClimChAlp, Alp-Water-Scarce, SILMAS, MANFRED.
Niederösterreich	Maßnahmen zur Anpassung werden in das Klima- und Energieprogramm für die Periode 2013–2020 inkludiert. Auftragsforschung zu Klimawandelfolgen auf regionaler Ebene für Niederösterreich.
Oberösterreich	Umfassende Strategie zur Anpassung im Juli 2013 veröffentlicht. Strategie für das Land Oberösterreich ist im Regierungsprogramm 2009–2015 erhalten. Auftragsforschung zu Klimawandelfolgen für das Land Oberösterreich; Teilnahme an Forschungsprojekten, wie AMICA, CLISP.
Salzburg	Keine umfassende Strategie zur Anpassung vorhanden, aber erste Aktivitäten gestartet. Auftragsforschung zu Klimawandelfolgen und mögliche Anpassungsmaßnahmen. Teilnahme an Forschungsprojekten wie CLISP.
Steiermark	Keine umfassende Strategie zur Anpassung vorhanden, aber erste Aktivitäten zur Strategieerstellung gestartet. Auftragsforschung zu Klimawandelfolgen bis 2050 vorliegend; Teilnahme an Forschungsprojekten, wie CLIP, GRaBS.
Tirol	Prozess zur Erstellung einer Strategie zur Anpassung (und Klimaschutz) 2013 unter Einbezug zahlreicher StakeholderInnen gestartet. Laufende Aktivitäten fokussieren sich auf Hochwasser, Permafrost und Wald. Teilnahme an Forschungsprojekten, wie WINALP.
Vorarlberg	Keine umfassende Strategie zur Anpassung vorhanden oder in Ausarbeitung. Befassung in unterschiedlichen Sektoren, wie z. B. Hochwasser, Katastrophenschutz.
Wien	Maßnahmen zur Anpassung werden laufend umgesetzt; Strategie in Ausarbeitung (im Rahmen des Klimaschutzprogramms II). Auftragsforschung zu Klimawandelfolgen.

1.3 Abstimmungsbedarf und Synergien zwischen Anpassung und Emissionsminderung
1.3 Synergies and trade-offs between adaptation and mitigation

1.3.1 Globale Verantwortung und lokale Notwendigkeit von Anpassung

Auf globaler Ebene wird rasch deutlich, dass die nachteiligsten Klimawandelfolgen vor allem in den Ländern der Subtropen und Tropen zu erwarten sind. In den meisten Fällen also in Entwicklungs- und Schwellenländern, die selbst bis dato kaum zum anthropogenen Klimawandel beigetragen haben. Dürre, Hitzewellen und Extremniederschläge finden sich unter denjenigen Klimawandelfolgen, die besonders schadensintensiv sind. Somit sind in diesen Ländern auch die Anpassungserfordernisse mit Abstand am höchsten. Dem soll der Grüne Klimafonds Rechnung tragen.

Eine entsprechende Finanzierung des Grünen Klimafonds ist hier wesentlich, da sich die Entwicklungsländer investitionsintensive Anpassungsmaßnahmen ansonsten nicht leisten können. Inwiefern Anpassung in die Entwicklungszusammenarbeit eingebracht werden kann, muss intensiv diskutiert werden. Fakt ist jedoch, dass die Finanzmittel für Anpassung neu aufgestellt werden müssen um die derzeit schon engen Entwicklungshilfebudgets nicht mit zusätzlichen Klimawandelanpassungsportfolios zuvbelasten. Gleichzeitig sind enge Kooperationen zwischen Industrie- und Entwicklungsländern zu Klimaschutztechnologien notwendig, um zu vermeiden, dass die Entwicklungsländer emissionsintensive Entwicklungspfade einschlagen.

Neben der globalen Verantwortung für den Klimaschutz und der Unterstützung für Anpassungsprozesse in Entwicklungsländern ergibt sich eine weitere Aufgabe, die auch Industrieländer wie Österreich angehen müssen, um wirtschaftliche Nachteile zu vermeiden: Nämlich die Anpassung unterschiedlicher Regionen und Sektoren an die Folgen des Klimawandels. Neben den intensiven Anstrengungen zum Klimaschutz wurde hier eine zweite Säule der Klimapolitik geschaffen, die nur auf den ersten Blick rein nationale Ziele verfolgt. Sollten die nationalen Volkswirtschaften etwa der EU die signifikanten Kosten des Nichthandelns einfach hinnehmen, kann dies weitreichende Folgen nach sich ziehen.

Es ist daher eine Abstimmung zwischen Minderung und Anpassung notwendig, damit etwa keine emissionsintensiven Anpassungsmaßnahmen implementiert werden, die durch Minderungsziele konterkariert werden würden. Dieser Abschnitt soll diesen Abstimmungsbedarf für die lokale Ebene und vor allem die Möglichkeiten einer Integration (Mainstreaming) von Anpassung in Klimaschutzpolitiken darstellen.

Die Publikationen[29] und politischen Strategien[30] der letzten Jahre illustrieren jedoch auch, dass erfolgreiche Anpassung ohne Klimaschutz undenkbar ist, da ohne Klimaschutz das Klimaänderungssignal mittel- bis langfristig so stark werden kann, dass Anpassung kaum mehr oder nur zu sehr hohen Kosten machbar wäre. Wenn es um die Minderung klima(wandel)bedingter wirtschaftlicher Schäden geht, wenn die Gesundheit und Lebensqualität von Menschen auf dem Spiel steht und wenn zudem irreversible Schäden an Ökosystemfunktionen drohen, kann kurz- bis mittelfristig nur die Klimawandelanpassung helfen, die größten Schäden zu vermeiden (vgl. Band 2, Kapitel 6).

Wesentlich bleibt allerdings, dass Anpassungsmaßnahmen ergriffen werden, die eine möglichst breite Spanne potenzieller Klimaänderungen abdecken. Die Spannweite möglicher Temperaturerhöhungen in Österreich liegt bei etwa ±3 °C, daher können kaum Maßnahmen ergriffen werden, die einer präzisen zeitlichen und räumlichen Projektion bedürfen. Während Klimaschutz, aufgrund der Trägheit des Klimasystems, bereits heute strikte Emissionsminderungsziele sowie Emissionsreduktionspfade bis 2050 erfordert, sollten Anpassungsmaßnahmen flexibel an die sich im Zeitverlauf ändernden Erfordernisse in Richtung Resilienzerhöhung adaptiert werden. Dennoch ist auch bei Anpassung eine Definition der Ziele hinsichtlich der zu vermeidenden Kosten bzw. der erzielbaren Gewinne (Schutzziele sowie Opportunitätsziele) erforderlich.

Mittlerweile bestehen mit dem nationalen Klimaschutzgesetz sowie der nationalen Anpassungsstrategie die legislativen Instrumente, um der Parallelherausforderung für Klimaschutz und Anpassung in Österreich gerecht zu werden. Natürlich müssen diese Instrumente nun auch in der Umsetzung gelebt werden.

[29] Insbesondere der Stern-Report (Stern, 2007) sowie der 4. Sachstandsbericht des IPCC (IPCC, 2007a,c) hatten hier einen starken meinungsbildenden Einfluss.

[30] Vgl. etwa die Roadmap der EU bis 2050 sowie deren 20-20-20-Ziele (20 % Reduzierung des Primärenergieverbrauchs durch Effizienzsteigerungen, 20 % Anteil Erneuerbare Energien und 20 % CO2-Äq.-Emissionsreduktion im Vergleich zum Jahr 1990)

1.3.2 Abstimmung zwischen Anpassung und Emissionsminderung

Unterschiedliche Fristigkeit von Emissionsminderung und Anpassung

Der menschliche Einfluss auf das heutige Klima liegt schon mehrere Jahrzehnte zurück. Da die Verweilzeit von THG in der Atmosphäre entsprechend lang ist, bleibt dementsprechend der Strahlungshaushalt lange modifiziert. Gleichzeitig wirkt der dadurch geänderte Wärmeumsatz in Atmosphäre, Geosphäre und Hydrosphäre (hier besonders in den Ozeanen) erst mit Verzögerung. Somit können auch heutige und künftige Klimaschutzmaßnahmen erst mit dieser Verzögerung greifen. Das heißt: Das Klimasignal für die nächsten 30 Jahre ist bereits weitgehend festgelegt – in Form der THG-Emissionen in der Atmosphäre sowie in Form erhöhter Energie (Temperatur) insbesondere in den Ozeanen.

Emissionsminderungsmaßnahmen wirken somit nie unmittelbar, jedoch kann durch gezielte Maßnahmen zur Rückführung von THG in der Atmosphäre eine langfristige Minderung des Klimawandels und seiner Folgen erreicht werden. In Industrieländern bleibt Emissionsminderung somit die zentrale Herausforderung im Sinne einer fairen globalen Lastenverteilung, der Generationengerechtigkeit sowie des sozialen Ausgleichs (reichere Bevölkerungsschichten haben in der Regel einen emissionsintensiveren Lebensstil).

Anpassung und Emissionsminderung sind auch insofern eng miteinander verwoben, als sich emissionsarme Anpassungspfade nur dann verwirklichen lassen, wenn sich eine Temperatursteigerung um +4 bis 5 °C vermeiden lässt. Das ist auch der Grund, weshalb Anpassung und Emissionsminderung als zwei Seiten einer Medaille aufgefasst werden sollten. Klimaschutz ist entscheidend, um die Unsicherheitsbandbreite nach oben zu begrenzen. Unsicherheitsbandbreiten jenseits einer Erhöhung um 2 oder maximal 3 °C würden solche massiven Anpassungen nach sich ziehen, die nicht mehr allein durch „softe“ oder „grüne“ Maßnahmen zu bewältigen sind, sondern auch „graue“ sprich technische und somit gleichzeitig kostenintensive Maßnahmen nach sich ziehen würden.

Dennoch zeigen auch Anpassungsmaßnahmen eine sehr weite zeitliche Streuung hinsichtlich ihrer Wirksamkeit. So sind etwa bautechnische Hochwasserschutzmaßnahmen oder Hangverbauungen sofort wirksam und bringen unmittelbar zusätzlichen Schutz bzw. tragen unmittelbar zur Schadensvermeidung bei. Gleiches gilt für die meisten Maßnahmen im Sektor Landwirtschaft (z. B. Umstellung der Bodenbearbeitung, Anbau neuer angepasster Sorten oder Installation von Bewässerungsanlagen). Mittelfristig wirksam sind zumeist planerische Maßnahmen wie die Ausweisung von Hochwasserschutzzonen, Retentionsflächen oder auch die Aufforstung von Schutzwäldern. Auch gibt es langfristig wirksame Schutzmaßnahmen gerade im Forstsektor.

CO_2-Intensität von Anpassungsmaßnahmen

Das Impact-Assessment zum Weißbuch zur Klimawandelanpassung (EK, 2009a) in Europa unterscheidet zwischen drei Arten von Anpassung:

- „grüne“ Anpassung: ökosystemorientierte Maßnahmen, die darauf abzielen, die Resilienz der Funktionalität von Ökosystemen zu erhöhen. Beispielsweise Maßnahmen, welche die Erosionsanfälligkeit von Böden reduzieren, die Grundwasserneubildung steigern oder die Biodiversität in Ökosystemen fördern.
- „softe“ bzw. planerische Anpassung: Nutzung der Raumordnung als Instrument für die Anpassung, beispielsweise durch Änderungen in den Bauordnungen, Ausweisung von Risikozonen mit Bebauungsstopp in den Flächenwidmungsplänen und insbesondere auch übergeordnete räumliche Planungsinstrumente, Verbreiterung der Wissensbasis, Know-How Transfer und gesteuerte Verhaltensänderungen.
- „graue“ Anpassung: bautechnische Maßnahmen (z. B. technischer Hochwasserschutz, Hangverbauungen) oder Maßnahmen, die den Einsatz von Energie (z. B. Einsatz von Klimaanlagen oder Bewässerungsanlagen) benötigen.

Zusätzlich als weitere eigenständige Art der Anpassung wäre zu benennen:

- „Anpassung durch fiskalische Instrumente“: Instrumente des Risikotransfers, sog. marktbasierte Instrumente, zu denen z. B. auch innovative Formen wie der konzipierte Adaptation Market Mechanism (Butzengeiger-Geyer et al., 2011) oder Steuerung des Ressourcenverbrauchs (etwa Benzinverbrauch, Wasserverbrauch usw.) durch Preissignale gehören.

Im Gegensatz zu „grauen“ Maßnahmen zur Klimawandelanpassung (Hochwasserschutzdämme, Hangverbauungen, Deicherhöhungen an den Küsten oder umfangreiche bauliche Konzepte wie sie zum Schutz von Städten wie Venedig oder London erarbeitet wurden), können grüne, softe und fiskalische Anpassungsarten folgende komparative Vorteile aufweisen:

- CO_2-Neutralität und Beitrag zu indirekten Emissionsminderungen (z. B. Schutzwaldaufforstungen).
- Kostengünstigkeit (oftmals sogar kostenfrei bzw. mit ökonomischen Vorteilen verbunden).
- Erhöhte Flexibilität in der Anpassung an sich ändernde Gegebenheiten.
- Geringe Invasivität in Naturräume und Vorteile hinsichtlich Natur- und Umweltschutz.[31]
- Möglichkeit zur Integration in bestehende Politiken und Instrumente (Policy Mainstreaming).

„Grüne", „softe" und finanzmarktbasierte Anpassungsarten bedingen somit oft Win-Win-Effekte (auch für den Klimaschutz) und sind aufgrund ihrer geringen Kosten sowie ihrer Reversibilität zumeist No- oder zumindest Low-Regret-Maßnahmen. Ihr Hauptnachteil liegt jedoch in der meist nicht unmittelbaren Wirkung, da sie eine Anlaufzeit benötigen, um ihre Schutzwirkung zu entfalten. Umgekehrt wirken „graue" Anpassungsmaßnahmen in der Regel unmittelbar. Auch innerhalb der grauen Maßnahmen bestehen erhebliche Unterschiede hinsichtlich ihrer THG-Wirkungen: Während die Inbetriebnahme einer Klimaanlage die THG-Bilanz verschlechtert, kann die nachträgliche Installation von Fensterbeschattungen in einem Bürogebäude klimaneutral sein.

Notwendigkeit integrativer Ansätze

Oftmals werden Anpassungsprozesse durch Extremereignisse ausgelöst. Auch in Österreich spielten die Augusthochwässer 2002 (in Ostösterreich) und 2005 (in Westösterreich) sowie die Hitzewelle 2003 eine nicht unwesentliche Rolle bei der Initialisierung eines Anpassungsprozesses, neben dem wachsenden politischen Willen sowohl auf nationaler als auch europäischer Ebene Anpassung zu stimulieren. Letztlich mündeten diese Ereignisse und Erkenntnisse in die Erstellung der nationalen Anpassungsstrategie an den Klimawandel.

Dabei ist bemerkenswert, dass in Österreich von Beginn an „grüne" und „softe / planerische" Anpassungsmaßnahmen im Vordergrund standen. Der „Aktionsplan zur Klimawandelanpassung in Österreich" (BMLFUW, 2012b) listet unter den 132 Handlungsempfehlungen fast ausschließlich Maßnahmen, die in diese beiden Kategorien fallen. Tatsächlich bringen nach einem ersten qualitativen Screening lediglich zwei Maßnahmen zusätzliche Emissionen, während 34 Maßnahmen Emissionen dauerhaft reduzieren. Das Gros der Maßnahmen (96) ist weitgehend emissionsneutral. Tatsächliche quantitative Analysen im Sinne einer umfassenden THG-Bilanz der gesamten Klimawandelanpassungsstrategie stehen allerdings noch aus.

Dieser Umstand könnte dem umsichtigen Beteiligungsprozess zu verdanken sein. Dahinter steht die Einsicht, dass sich „grüne" und „softe / planerische" Maßnahmen sehr viel besser in bestehende Politiken eingliedern lassen. Damit ist davon auszugehen, dass die Zielkonflikte zwischen Klimaschutz und Anpassung, die sich aus der nationalen Anpassungsstrategie ergeben, sehr gering sein werden.

Allerdings wird Anpassung nicht allein über die nationale Anpassungsstrategie gesteuert. Diese gibt lediglich einen Handlungsrahmen vor. Anpassung wird primär auf Ebene der Bundesländer, Regionen und Gemeinden sowie autonom in Unternehmen und Haushalten stattfinden. Hier ist sehr wohl darauf zu achten, dass Anpassung und Klimaschutz nicht in Zielkonflikten münden. Daher ist eine Unterstützung für Gemeinden, Regionen, Bundesländer, Unternehmen und BürgerInnen bei der Klimawandelanpassung erforderlich. Wenn Fehlanpassung im Sinne von Zielkonflikten mit dem Klimaschutz vermieden werden sollen, so müssen Instrumente geschaffen werden, die vor Ort eine möglichst rasche Beurteilung von geplanten Maßnahmen hinsichtlich ihrer CO_2-Intensität, ihrer sozialen und Umweltwirkungen ermöglichen.

Gerade weil konkrete Anpassungsmaßnahmen in den meisten Fällen vor Ort / auf niedriger Skalenebene angegangen werden müssen, ist umso mehr darauf zu verweisen, wie wesentlich integrative Ansätze sind.

Robuste und emissionsarme Anpassungspfade

Klimamodelle stellen Ergebnisse in Form von Szenarien mit Unsicherheitsbandbreiten zur Verfügung. Die Vulnerabilität einer Gruppe / Region gegenüber dem Klimawandel verändert sich aber nicht nur mit den Klimaänderungen sondern auch durch viele andere sozio-ökonomisch, technologisch oder demografisch bedingte Faktoren. Daher wird der „Marginal Climate Change Impact Abatement" (MIA) – im Sinne des klassischen Predict-and-Provide-Ansatzes, bei dem man für die durch den Klimawandel bedingten zusätzlichen Klimawandelfolgen „optimale" Anpassungen schafft – zunehmend durch einen „Adaptation through Climate Resilience" (ACR)-Ansatz

[31] Trotzdem können auch „grüne" Maßnahmen unerwünschte Folgen nach sich ziehen: Etwa sind Aufforstungen mit Douglasien oder Grünraumpflanzungen mit Robinien kritisch zu beurteilen und können langfristig zu Nachteilen führen. Gleichzeitig sind manche „graue" Maßnahmen zwar zunächst mit zusätzlichen Emissionen verbunden, führen in weiterer Folge aber zu Emissionsminderungen (z. B. Gebäudedämmung).

ersetzt. Hierbei stehen dann anstelle von Einzelmaßnahmen vielmehr Anpassungspfade im Vordergrund, die entlang einer Klimagefährdungskette an verschiedenen Stellen robuste – in den seltensten Fällen optimale (mit Unsicherheiten versehene Entwicklungen können kaum „optimal" bedient werden, Dessai et al., 2009) – Maßnahmen setzen und somit immer wieder flexibel reagiert werden kann (Downing, 2012).

Es werden nur in den seltensten Fällen tatsächlich bauliche „graue" Maßnahmen sein können (Ausnahme Gebäudesanierung und -neubau), sondern vielmehr „grüne" und „softe" / planerische Maßnahmen, die an vielen Stellen (und mit vielen zu beteiligenden AkteurInnen) immer wieder Resilienzen erhöhen. Damit ist der ACR-Ansatz von der Anlage her sehr viel besser kompatibel mit dem Klimaschutz als der MIA-Ansatz.

Ausgehend von der Erkenntnis, dass Klimawandelanpassung von massiven Unsicherheiten geprägt ist, schlägt der IPCC-Bericht zu Extremereignissen (IPCC, 2012a) als robuste Handlungsstrategie sogenannte Maßnahmen „geringen Bedauerns" (Low Regret Options) vor. Dies sind Maßnahmen, die über verschiedene Zukunftsszenarien hinweg robust Vorteile erbringen, wobei sich der Nutzen infolge von gesteigerter Resilienz unmittelbar ergibt, gepaart mit einer zukünftigen Vulnerabilitätsreduktion. Die Maßnahmen reichen von verbesserten Frühwarnsystemen für Überschwemmungen, über hitzeresistentes Saatgut, oder innovative Versicherungslösungen bis zu umfassender Risikokommunikation. Interessant ist an diesem Konzept, dass das ökonomische Optimalitätskriterium (No Regret) nicht völlig eingefordert wird. Obwohl einige Ansätze zur Formalisierung existieren, ist die vorgeschlagen Strategie eher als heuristisches Instrument zu verstehen, welches den Blickwinkel auch darauf richtet, dass Anpassung an Klimavariabilität sinnvoll zur Anpassung an den Klimawandel beiträgt, da diese beiden eng miteinander verknüpft sind.

Emissionsarme oder ggf. sogar emissionsmindernde Anpassungspfade, die Resilienzsteigerungen mit Hilfe „grüner", „softer" / planerischer oder auch finanzmarktbasierter Anpassungsmaßnahmen und Instrumente erreichen, wären demnach aus Klimaschutzsicht ideal und aus Klimawandelanpassungssicht die flexibelsten, kosteneffizientesten und minimalinvasivsten Pfade. Die Instrumente, um derartige Pfade umzusetzen, stünden prinzipiell zur Verfügung: Im Rahmen der Umweltverträglichkeitserklärung (UVE) sind auch die Klimawirkungen von (Bau-)Projekten im Zuge der Wirkungsfolgenabschätzungen (WFA) kurz darzulegen. Zusätzlich könnte im Rahmen der Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) eine umfassende Bewertung von (Bau-)Projekten, auch im Sinne einer Klimaverträglichkeitsprüfung, erfolgen. Tatsächlich bestehen in Österreich derzeit weder im Rahmen der UVP noch in einem anderen institutionellen Rahmen konkrete Ansätze, um Klimaschutz und -anpassung parallel und sich ergänzend als bindende Kriterien zu etablieren.

Abstimmungsbedarf zwischen Anpassung und Emissionsminderung

Während also in zunehmendem Maße die möglichen Synergien zwischen Emissionsminderungs- und Klimaanpassungsmaßnahmen diskutiert werden, existiert ein Abstimmungsbedarf bzw. Trade-off bei Maßnahmen, die einen positiven Klimaschutzeffekt aber einen negativen Anpassungseffekt, oder umgekehrt, einen positiven Anpassungs- aber einen negativen Klimaschutzeffekt aufweisen.

Bei der Bewertung von Maßnahmen zu THG-Minderung und Anpassung wäre es aus volkswirtschaftlicher Sicht irreführend, sie nur den damit verbundenen Investitionskosten gegenüber zu stellen. Vielmehr müssen Synergien und Trade-offs soweit als möglich quantitativ aber auch qualitativ berücksichtigt werden, um eine volkswirtschaftlich optimale Reihung von Minderungs- und Anpassungsmaßnahmen zu ermöglichen. Synergien oder Konflikte können bereits bei der Durchführung einer einzigen Maßnahme auftreten oder bei der Implementierung zweier unabhängiger Maßnahmen zusammenwirken.

Wie Box 1.5 verdeutlicht, münden demnach energie- bzw. ressourcenintensive Anpassungsmaßnahmen in Zielkonflikten zwischen Klimaschutz und Anpassung.

Umgekehrt können einige Klimaschutzmaßnahmen die Resilienz gegenüber Klimaveränderungen reduzieren und somit den Anpassungsbedarf erhöhen. Das gilt insbesondere für Klimaschutzmaßnahmen, die in Ökosysteme eingreifen. Beispiele hierfür sind die Nutzungskonflikte zwischen Windrädern und Landschaftsschutz, Wasserkraft und Fließgewässerverbau, Geothermie und Grundwasserschutz sowie v. a. auf internationaler Ebene zwischen Biotreibstoffen (insbesondere der ersten Generation) und Nahrungsmittel sowie zwischen Photovoltaik und seltenen Erden. Auch kann sich die Resilienz gegenüber klimatischen Veränderungen im Zeitverlauf verändern: So kann etwa ein Ausbau der Wasserkraft in glazialen Abflussregimen (Flussoberläufe) für einen gewissen Zeitraum als opportun (klimaangepasst) erscheinen, jedoch nach einem weitgehenden (durch den Klimawandel beschleunigten) Rückgang der Gletscher im Einzugsgebiet als komplett unangepasst erweisen.

Box 1.5: Beispiele für Klimaanpassungsmaßnahmen mit negativer Klimaschutzwirkung (Quelle: Türk et al., 2010)

Box 1.5: Examples for adaptation measures with negative effect on mitigation (Source: Türk et al., 2010)

Abstimmungsbedarf thermische Anpassung

Durch die Deckung des zusätzlichen Kühlenergiebedarfs von Gebäuden durch konventionelle Klimaanlagen treten entsprechende THG-Emissionen auf. Ferner verursacht die Flucht von Städtern aus überhitzten urbanen Räumen in ländliche bzw. kühlere Regionen zusätzliches Verkehrsaufkommen mit entsprechenden THG-Emissionen. Ein zusätzlicher Einsatz von Klimaanlagen in Fahrzeugen führt zu erhöhtem Kraftstoffverbrauch und mehr Emissionen.

Abstimmungsbedarf hygrische Anpassung in der Landwirtschaft

Ein zusätzlicher Einsatz von energieintensiver Bewässerung zur Kompensation dürre- und hitzebezogener Ernteausfälle führt ebenfalls zu erhöhten Emissionen, insbesondere dann, wenn nicht klimaangepasste Formen der Bewässerung zum Einsatz kommen (z. B. Beregnung um die Mittagszeit).

Abstimmungsbedarf Wintertourismus

Der durch Klimawandel bedingte zusätzliche Betrieb von Schneekanonen ist ein weiteres Beispiel für eine Anpassungsmaßnahme, die aufgrund des benötigten Energieeinsatzes eine negative Klimaschutzwirkung mit sich bringt und außerdem durch den hohen Wasserbedarf Konflikte mit anderen Aktivitätsfeldern der Anpassung nach sich zieht (hier v. a. Wasser- und Landwirtschaft). Diese Maßnahme könnte somit auch als Maladaptation bezeichnet werden.

1.3.3 Nutzung von Synergien zwischen Anpassung und Emissionsminderung

Zunehmend werden neben der Notwendigkeit, sowohl Emissionsminderungs- als auch Adaptionsmaßnahmen umzusetzen, Synergien zwischen diesen Aktivitäten erkannt (zu weiteren Synergien und Konflikten im Energiebereich vgl. Band 3, Kapitel 3). Emissionen aus Energieeinsatz und -umwandlung tragen in Österreich mehr als 80 % zu den THG-Emissionen bei (Anderl et al., 2010). Es liegt damit auf der Hand, dass Energieeinsatz und -aufbringung wesentliche Zielbereiche von Klimaschutzmaßnahmen sind. Gleichzeitig ist der Energiesektor auch wesentlich durch den Klimawandel betroffen (Energienachfrage für Heizen und Kühlen, Stromversorgung durch Wasserkraft und andere Erneuerbare Energien, Kühlwasserproblematik bei thermischen Kraftwerken, vgl. Band 3, Kapitel 3). Emissionsminderungsmaßnahmen im Energiesektor haben ein besonders hohes Potenzial, Anpassung mitzudenken und entsprechend zu integrieren. Bei genauerer Analyse zeigen sich folglich substanzielle Synergien.

Der Schlüssel zur Reduktion der Vulnerabilität liegt in der Sensitivität der Gesellschaft gegenüber dem Energieverbrauch und in der Abhängigkeit von wenig diversifizierten, zentralen Ressourcen. Es sind daher vor allem die folgenden drei Maßnahmen, die zur Verringerung der Vulnerabilität beitragen können:

- Reduktion des Energieverbrauchs und der Spitzenlast.
- Diversifizierung des Energieträger-Mix, insbesondere durch erneuerbare Energieträger.
- Dezentralisierung des Energiesystems. Damit ergibt sich mit diesen Maßnahmen eine sehr hohe simultane Klimaschutz- und Anpassungswirkung sowie Synergie mit anderen aktuellen Trends und Herausforderungen im Energiesystem.

In Box 1.6 werden Beispiele angeführt, bei denen eine besonders hohe synergetische Wirkung zwischen Klimaschutz und -anpassung vorliegt.

Neben diesen beispielhaften synergetischen Maßnahmen im Bereich Energie ist als wesentliche Komponente zu berücksichtigen, dass sich das Energiesystem derzeit in einem substanziellen Transformationsprozess befindet. Zahlreiche Szenarien und Studien deuten darauf hin, dass sich dieser in den kommenden Jahren und Jahrzehnten voraussichtlich noch deutlich intensivieren wird (Lilliestam et al., 2012a; PwC et al., 2010). Der politisch angestrebte Umbau zu einem Low-Carbon-Energie-

Box 1.6: Beispiele für synergistische Wirkungen zwischen Emissionsminderung und Klimawandelanpassung im Bereich Energie (Quelle: Kranzl et al., 2010)

Box 1.6: Examples for synergistic effects between mitigation and adaptation in the field of energy (Source: Kranzl et al., 2010)

Passive Maßnahmen zur Reduktion von Kühllasten an Gebäuden

Durch gebäudeseitige, passive Maßnahmen ist es möglich, Kühllasten stark zu reduzieren. Dies beinhaltet beispielsweise Abschattung, zusätzliche Speichermassen, passive Ventilationsmaßnahmen etc. Dies reduziert den Verbrauch von Kühlenergie und die damit verbundenen THG-Emissionen.

Reduktion innerer Lasten

Neben solaren Einträgen stellen innere Lasten eine wesentliche Ursache für Kühllasten dar. Die Reduktion dieser inneren thermischen Lasten geht im Allgemeinen mit einer Erhöhung der Energieeffizienz von Geräten einher (z. B. Beleuchtung, EDV, Weißware) und daher potenziell mit einer Reduktion entsprechender THG-Emissionen.

Photovoltaik (PV) als Kapazitätsbeitrag im Sommer

Aufgrund eines steigenden Bedarfes zur Klimatisierung steigt auch die Netzbelastung in Zeiten hohen Kühlbedarfs. Durch Bereitstellung der entsprechenden Kühlenergie vor Ort durch Gebäude- und fassadenintegrierte PV reduziert sich einerseits die Netzbelastung und der notwendige Beitrag von zentralen Großkraftwerkstechnologien, andererseits können die PV Zellen als Beschattungselemente dienen. In diesen Zeiten bietet die PV daher eine Maßnahme mit optimaler Synergie zwischen Klimaschutz und -anpassung. Die Stromerzeugung der PV außerhalb der Zeiten hohen Kühlbedarfs trägt noch zusätzlich zum Klimaschutz bei.

system auf Basis erneuerbarer Energie würde auch bedeuten, dass die Bereitstellung von Energie zunehmend vom Wettergeschehen und damit vom Klima beeinflusst wird (Wind, Sonne, Wasser und Biomasse). Daher kann potenziell auch die Verwundbarkeit gegenüber Klimawandel bedingten Ereignissen steigen. Für eine erfolgreiche Energiewende werden somit die frühzeitige Berücksichtigung von Risiken und entsprechende Anpassungsmaßnahmen von steigender Relevanz sein. Eine detailliertere Betrachtung der Herausforderungen dieses und weiterer Transformationsprozesse hinsichtlich des Klimaschutzes und der Klimaanpassung erfolgt in Band 3, Kapitel 6.

Darüber hinaus existieren auch in anderen Bereichen Maßnahmen, die mit dem Energiesystem indirekt verknüpft sind und Synergien zwischen Klimaschutz und -anpassung aufweisen. Als Beispiel sei hier aus der Forstwirtschaft der Umbau sekundärer Nadelwälder in Laub(Nadel)mischwälder genannt. Sekundäre nicht standortangepasste Nadelwälder in Tieflagen sind gegenüber den möglichen Folgen des Klimawandels besonders anfällig. Hierbei handelt es sich vor allem um von Fichten dominierte und gegenüber Trockenstress und Borkenkäferschäden besonders anfällige Bestände auf Laubmischwaldstandorten. Durch den Umbau / die Überführung in besser angepasste Laub(Nadel)mischwälder wird das Risiko von negativen Folgen durch den Klimawandel (Kalamitäten) verringert und die autonome Anpassungsfähigkeit der Wälder verbessert. Gleichzeitig stellen Forstprodukte sowohl im Ersatz energieintensiver Rohstoffe (z. B. Holzbau) als auch als biogene Energieträger eine wesentliche Säule von Klimaschutzmaßnahmen dar. Die Steigerung der autonomen Anpassungsfähigkeit der Wälder ist daher auch als Voraussetzung für die entsprechenden Klimaschutzmaßnahmen zu werten.

Weitere Beispiele für synergetische Klimaschutz- und Anpassungsmaßnahmen in den Sektoren Verkehr, Landwirtschaft und Stadtplanung sind (nach Tuerk et al., 2010):

- Vergrößerung des Rückstrahleffekts (Albedo-Effekt) auf Außenoberflächen wie Dächern, Straßen, Autos und Parkplätzen, um das Aufheizen von Oberflächen zu verringern. Dies ist eine einfache und erschwingliche Option, die eine Kombination von Anpassung und THG-Minderung bedeutet und mit vergleichsweise niedrigen Kosten eingeführt werden kann.
- Pflanzung schattenspendender Bäume. Diese Option hilft während des Sommers, sich an Hitze anzupassen

und den Energieaufwand durch Kühlung zu verringern. Schattenspende Bäume reduzieren auch Bodenerosionen und erhöhen die Grundwasserneubildung – insbesondere im urbanen Raum.

- Direktsaat, Mulchen und reduzierte Bodenbearbeitung verringern die Erosionsanfälligkeit durch Steigerung der Wasserspeicherkapazität des Bodens und bessere Bodenstruktur (geringere Bodenverdichtung, mehr Infiltration). Außerdem kann eine Abnahme der durch das Pflügen verursachten Oxidation des organischen Kohlenstoffs im Boden erreicht werden.

1.4 Barrieren gegenüber effektiven Minderungs- und Anpassungsstrategien
1.4 Obstacles to effective adaptation and mitigation

Trotz glaubwürdiger Vorhersagen und Warnungen zu den erwartbaren Konsequenzen des Klimawandels sind auf globaler Ebene nach wie vor steigende THG-Emissionen zu verzeichnen. In Österreich beispielsweise ist der gesamte Bruttoinlandsverbrauch seit 1990 um 29 % gestiegen, der für fossile Energieträger um 14 % (Anderl et al., 2011a). WissenschaftlerInnen prognostizieren drastische Auswirkungen (IPCC, 2007c; Rockström et al., 2009), sollten keine effektiveren Maßnahmen getroffen werden. Angesichts der realen Bedrohung sind die beobachtbaren Aktivitäten zur notwendigen Reduktion von Emissionen ungenügend, sowohl auf institutioneller als auch auf persönlicher Ebene (Grossmann et al., 2009). Obwohl die öffentliche Wahrnehmung und das Problembewusstsein in den vergangenen Jahren stark gestiegen sind, spiegelt sich dies nur bedingt in konkreten Maßnahmen wider (EESI, 2007). Auch der in Deutschland ansässige „Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen" (WBGU, 2011) kommt zum Schluss, dass ein Wertewandel in Richtung einer positiveren Einstellung zu Klima und Umweltschutz bereits begonnen hat.

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit den Gründen dieser Diskrepanz und möglichen Strategien um Verhaltensänderungen zu bewirken und kollektive Maßnahmen zu fördern, etwa durch verstärkte Einbindung der Privatwirtschaft zur Verringerung oder Vermeidung von THG-Emissionen. Gleichzeitig wird ein Überblick der bislang umgesetzten Emissionsminderungs- und Anpassungsstrategien sowie der verbleibenden Barrieren aus technologischer, ökonomischer und sozialer Sicht gegeben. Während natürliche Systeme Grenzen der Belastbarkeit (Planetary Boundaries) aufweisen, sind soziale Systeme durch überwindbare Barrieren (Belastbarkeitsgrenzen in ökonomischen Systemen sind verschiebbar) charakterisiert (Rockström et al., 2009; Moser und Ekstrom, 2010). Unsicherheiten und deren Darstellung in den Medien haben einen bedeutsamen Einfluss auf die zugrundeliegenden Allokations- und Entscheidungsfindungsprozesse. Die mangelhafte Integration dieser Prozesse in andere politische Bereiche lässt sich in vielen Fällen durch wahrgenommene oder reale Interessenskonflikte erklären.

1.4.1 Institutionelle und Governance-Barrieren

Kurzer Zeithorizont politischer Entscheidungsprozesse

Politische EntscheidungsträgerInnen fokussieren ihre Tätigkeit gewöhnlich auf kurzfristige Kosten und Nutzen und nicht auf langfristige Transitionen (Berrang-Ford et al., 2011). Maßnahmen zur Minderung des Klimawandels führen jedoch zu Anfangsinvestitionen in der Gegenwart und Nutzeffekten in Form verhinderter Klimawandelfolgen in der Zukunft. Dies erschwert die Gestaltung sowie die Umsetzung politischer Maßnahmen (Smith et al., 2009). Aber selbst wenn die zukünftigen Nutzeffekte in die Entscheidung mit einbezogen werden, müssen zukünftige Nutzen und Kosten auf den Entscheidungszeitpunkt diskontiert werden. Die verwendete Diskontrate sollte die Zeitpräferenz der Gesellschaft, die Zunahme des Konsums über die Zeit und den Abtausch zwischen heutigem und zukünftigem Konsum (Nutzenelastizität) abbilden (Watkiss, 2011). Je höher die verwendete Diskontrate, desto geringer fallen vermiedene Schäden in der Zukunft relativ zu heutigen Investitionen ins Gewicht. Während im Stern Report (Stern, 2007) eine Diskontrate nahe Null zu Grunde gelegt wurde, besteht zwischen ÖkonomInnen Unstimmigkeit über eine angemessene Höhe der Diskontrate (siehe z. B. Nordhaus, 2007a). Wenig widersprüchlich ist jedoch, dass Marktzinssätze aufgrund von Marktversagen auf langfristigen Finanzanlagemärkten eine unvollkommene Näherungsgröße darstellen (Arrow et al., 2004).

Eigeninteressen & Macht

Während der Industrialisierung haben sich Wirtschaft und Energiesysteme unter wechselseitiger Beeinflussung stark gewandelt (Sieferle 2010; Sieferle et al., 2006). Rezente Wirtschaftsstrukturen der industrialisierten Welt einschließlich der in Österreich sind entsprechend stark auf das fossil energetisch

dominierte Energiesystem ausgerichtet. WirtschaftsakteurInnen, die von diesem Status Quo profitieren, erschweren aufgrund ihrer ausgeprägten Einzelinteressen (Vested Interests) oft durch das Einlegen von öffentlichen aber auch informellen Vetos den Übergang zu einer kohlenstoffarmen Gesellschaft (WBGU, 2011). Prominentes Beispiel, wie derartige Eigeninteressen sich gegen eine auf das Allgemeinwohl abzielende Klimapolitik stellen, ist die Aufrechterhaltung des auf fossiler Energie basierten Energiesystems durch die Ölindustrie (Moe, 2010). Der für eine Dekarbonisierung notwendige Wandel wird zudem erschwert, da diese Eigeninteressen durch staatliche Institutionen und Subventionen z. B. für die Exploration neuer Reserven und den Konsum gestützt werden (Cheon et al., 2013; G-20 Leaders, 2009; McLure, 2013).

Organisationen mit heterogenen Zielen, Eigentümerstrukturen und Geschäftsmodellen haben sehr spezifische Herangehensweisen in Bezug auf die Entwicklung und Umsetzung von Anpassungs- und Emissionsminderungsstrategien. In der Überwindung von Barrieren spielt die Akquisition und Allokation unternehmerischer Ressourcen eine wichtige Rolle. Die Existenz von Marktversagen und negativen externen Effekten (also die Auswirkungen ökonomischer Entscheidungen auf unbeteiligte MarktteilnehmerInnen) in vielen Branchen zeigen, dass es bislang noch nicht gelungen ist, die Kosten umweltrelevanter Maßnahmen transparent und fair zu verteilen (Held et al., 2007).

Governance

Zentrale Barrieren politischer Entscheidungsfindung umfassen unter anderem fehlendes politisches Commitment, inadäquate oder unklare Zuständigkeiten, inadäquate Kooperation zwischen politischen AkteurInnen, zu geringe Expertise bei EntscheidungsträgerInnen, keine zufriedenstellenden Lösungen sowie die Komplexität möglicher Wirkungen und Ergebnisse von politischen Entscheidungen (Clar et al., 2012). Ursachen für fehlendes politisches Commitment reichen von kurzen Planungshorizonten, der geringen Bedeutung von Klimawandel relativ zu anderen Politikfeldern, bis zu fehlendem adäquaten Leadership (Moser und Ekstrom, 2010). Zudem können auch Trade-offs zwischen Klimaschutz und Anpassung (vgl. Abschnitt 1.3) bestehen, die in der Vergangenheit oftmals zu Lasten der Anpassung gelöst wurden. Bestehende Aufgabenverteilungen, Kompetenzen und Zuständigkeiten zwischen Ministerien und Ämtern aber auch zwischen öffentlichen und privaten Institutionen bedeuten, dass Klimaschutz und Anpassung häufig Querschnittsmaterien sind (Steurer und Trattnigg, 2010). Der sich daraus ergebende Koordinationsbedarf ist daher erheblich und erfolgt oft mangelhaft, indem entweder auf Handlungen der übergeordneten Behörde gewartet wird oder Zuständigkeiten aufgrund von Uneinigkeiten über die Kostenaufteilung zurückgewiesen werden (Clar et al., 2012). Ein weiteres Koordinationsproblem betrifft die Abstimmung politischer Zielvorgaben zwischen unterschiedlichen Politikbereichen, die zu einander in Widerspruch stehen können. Inadäquate Koordination besteht hier etwa zwischen der Energiepolitik und anderen Politikfeldern (Verkehr, Landwirtschaft, Tourismus, Raumplanung und Industrie). So steht der Ausbau der transeuropäischen Netze, die den Güter- und Personenverkehr auf der Straße forcieren, im eklatanten Widerspruch zu Klimaschutzzielen (Richardson, 1997).

Zur Überwindung von institutionellen und Governance-Barrieren ist daher eine grundlegende Veränderung der Denkweise erforderlich, die eines übergreifenden, systemischen Ansatz zum Ressourcenmanagement bedarf und in einen breiteren wirtschaftspolitischen Rahmen eingebunden ist (Dobbs et al., 2011). Dies erfordert auch, dass die zuständigen Behörden mit den entsprechenden Kompetenzen (Wissen, Personal, Budget) ausgestattet werden (Dobbs et al., 2011).

Die Analyse von Kommunikations- und Austauschbeziehungen erhöht die Transparenz von Informationsflüssen und stellt ein weiteres wichtiges Werkzeug für politische EntscheidungsträgerInnen dar, um die Akzeptanz geplanter Maßnahmen zu beurteilen. Erhöhte Transparenz hilft Interessenskonflikte zu erkennen, fördert die Entwicklung von Strategien mit breiter öffentlicher Unterstützung und reduziert die Wahrscheinlichkeit von Fehlinterpretationen oder bewussten Manipulationen – zum Beispiel Versuche, Einzelmeinungen als repräsentative Aussagen zu positionieren.

Getting the Prices Right: Internalisierung externer Kosten und Nutzen

Aus ökonomischer Sicht führt die Nutzung fossiler Energieträger zu einem Externalitäten-Problem, wenn die bei Dritten anfallenden Kosten (des Klimawandels) nicht in den Preisen und somit Kosten berücksichtigt werden. Bei fossilen Energieträgern sind zwei Externalitäten-Kanäle bedeutsam: einerseits spiegeln die Preise der Energieträger nicht deren Kohlenstoffbilanz wider; dies setzt sich bei der Bepreisung von Gütern und Dienstleistungen fort, die ebenfalls nicht die THG-relevante Kohlenstoffbilanz im gesamten Kohlenstoffzyklus berücksichtigen (van den Bergh, 2012). Andererseits werden fossile Energieträger und energieintensive Produkte direkt oder indirekt gefördert, indem beispielsweise die Exploration neuer Quellen subventioniert wird oder CO_2-intensive Anpassungsoptio-

nen (Klimaanlagen, künstliche Beschneiung, etc.) unterstützt werden. Ebenfalls führt eine fehlende Planungssicherheit bei der Unterstützung von erneuerbaren Energieträgern (z. B. in Form mittelfristig gültiger Einspeisetarife) zu einer zu niedrigen Marktdurchdringung von erneuerbaren Energieträgern.

Finanzierung von Technologietransfer und Anpassung in Entwicklungsländern

Wie in Abschnitt 1.2.1 thematisiert, sind die Folgen des Klimawandels v. a. in Entwicklungsländern spürbar, wo die Anpassungskapazitäten niedrig sind. Die im Copenhagen Accord genannten finanziellen Beträge der Industrieländer zur Unterstützung der Minderung und Anpassung in Entwicklungsländern sind unzureichend, zumal teilweise Mittel der generellen Entwicklungshilfe umgewidmet wurden. Gleichzeitig übernehmen die Industrieländer aus Sicht vieler Entwicklungsländer zu wenig Verantwortung für ihren Beitrag zu vergangenen THG-Emissionen.

1.4.2 Wirtschaftliche Barrieren

Finanzielle Herausforderung der Dekarbonisierung eines komplexen Systems

Um die vereinbarten Klimaschutz- und Anpassungsziele erreichen zu können, ist eine Änderung von Konsumgewohnheiten, Produktion sowie der Infrastruktur erforderlich (WBGU, 2011; van den Bergh, 2012). Eine wesentliche Barriere der Umsetzung politischer Maßnahmen stellen fehlende finanzielle Ressourcen dar (Smith et al., 2009). Erschwert wird dies dadurch, dass Klimaschutz und Anpassung mit schrittweisen Vorgehensweisen (z. B. lediglich Forschungsfinanzierung, nicht aber für Umsetzung und Monitoring) häufig nicht realisierbar sind (Moser und Ekstrom, 2010).

Barrieren in technologischen Innovationssytemen, welche die Diffundierung von Innovationen in den Massenmarkt beschränken, bestehen beispielswiese auch in Form mangelnder Flexibilität bezüglich Geschäftsfeldern, sowie fehlendem Vertrauen in zukünftige Märkte oder aus Schwierigkeiten bei der Mobilisierung finanzieller Ressourcen (Bergek et al., 2008). Investitionen zur Energieeinsparung können weiters für EigentümerInnen nicht rentabel sein, wenn diese die Kosten nicht auf die NutzerInnen übertragen können, obwohl diese daraus einen finanziellen Vorteil ziehen (z. B. thermische Althaussanierung; Schleich und Gruber, 2008).

Klimapolitik als internationale Herausforderung und Risiko der Emissionsverlagerung (Carbon Leakage)

Internationaler Klimaschutz ist ein öffentliches Gut, das zu Trittbrettfahrerverhalten führt (vgl. z. B. Nordhaus, 2007b). Studien zum Zustandekommen globaler Umweltabkommen zeigen, dass ein globales Abkommen immer dann schwer zu erreichen ist, wenn ein großer Unterschied zwischen individuell und global optimalen Reduktionszielen besteht, bzw. dass ein globales Abkommen, sollte es zustande kommen, nur sehr schwache Ziele beinhaltet (Barrett, 1994). Umgekehrt wird ein Abkommen dann erleichtert, wenn mehrere regionale Abkommen möglich sind, wenn es Transferzahlungen gibt oder wenn ein Umweltziel mit einem anderen Ziel verknüpft wird (z. B. Schuldenerlass, vgl. Carraro und Siniscalco, 1998; Barrett, 2003; Asheim et al., 2006).

Mit der Vertragsstaatenkonferenz in Kopenhagen 2009 erfolgte ein Übergang von einer Top-Down zu einer Bottom-up-Architektur, in der einzelne Staaten oder Regionen ihre Klimapolitik in Form so genannter Pledges (Zusicherungen) bekannt geben und in nationalem Recht implementieren. Ohne internationale Koordination und Verbindlichkeit dieser Vorhaben sind daher viele Staaten nicht bereit, verbindliche Reduktionsverpflichtungen einzugehen. Durch Emissionsvermeidung beispielsweise innerhalb der EU kann es somit zu Emissionsanstieg im EU-Ausland kommen. Dieses Phänomen wird als Carbon Leakage (also Verlagerung von CO_2-Emissionen) bezeichnet. Während Carbon Leakage für die erste und zweite Phase des EU Emissionshandels mit einer Größenordnung von 10 bis 30 % nur eine untergeordnete Rolle spielte (Babiker, 2005; Babiker und Rutherford, 2005; Barker et al., 2007; Kuik and Hofkes, 2010; Paltsev, 2001), kann Carbon Leakage bei strengeren Zielen, einer Erstversteigerung der Emissionszertifikate und rasch wachsenden Schwellenländern in Zukunft zu einem größeren Problem werden (Bednar-Friedl et al., 2012). Rund 50 % des Carbon Leakage-Effekts entsteht über Feedbacks (Rückkoppelungen) von internationalen Rohstoffmärkten, da eine reduzierte Nachfrage nach fossilen Energieträgern in den regulierten Regionen zu einer Preisreduktion und somit zu einer Zunahme der Rohstoffnachfrage in nicht-regulierten Ländern führt (Böhringer et al., 2010; Fischer und Fox, 2007).

Rebound-Effekte und das Grüne Paradoxon

Ein mit dem Carbon-Leakage-Effekt verwandtes Problem ist der Rebound-Effekt, demzufolge Energieeffizienzsteigerungen

aufgrund von auftretenden Output-, Substitutions-, Wettbewerbs- und Einkommenseffekten (Hanley et al., 2009) zu einer erhöhten Energienachfrage führen (Brookes, 1990; Khazoom, 1980). Die Schätzungen des Rebound-Effekts variieren jedoch stark nach Aktivität (Heizen, Industrieprozesse, Verkehr) und Studie (van den Bergh, 2011).

Ein weiteres Problem ist das Grüne Paradoxon (Sinn, 2008). Darunter versteht man die These, dass die Ankündigung, die Klimapolitik zu verschärfen, wie eine Enteignung der BesitzerInnen fossiler Energieträger wirkt. Dies führe dazu, dass der Abbau fossiler Ressourcen und somit der THG-Ausstoß zunächst beschleunigt würde. Während dieses Paradoxon als Argument gegen die Sinnhaftigkeit einer raschen Energiewende verwendet werden könnte, zeigen Edenhofer und Kalkuhl (2011) jedoch, dass dieses Paradoxon nur unter sehr spezifischen (unrealistischen) Annahmen auftritt.

1.4.3 Soziale Barrieren

Die Anpassungsfähigkeit einer Gesellschaft ist unter anderem von vorhandenem Wissen, Risikobereitschaft, Einstellungen und Kultur abhängig (Adger et al., 2007). Anders ausgedrückt hängt sie von der Ausstattung verschiedener Kapitalien ab. Das sind neben Natur-, Finanz- und Infrastrukturkapital vor allem auch Human- und Sozialkapital (vgl. Box 1.7).

Diskrepanz zwischen Umweltbewusstsein und umweltbewusstem Handeln

Die Bereitschaft, klimagerecht zu handeln, ist bei einem Großteil der österreichischen Bevölkerung gegeben. Die Verantwortung für klimabewusstes Verhalten schreiben die Befragten mehrheitlich sich selbst zu, übertragen diesen Bereich also nicht ausschließlich auf Unternehmen oder die Politik (Boecker, 2009; WWF und Karmasin, 2010). Wenn jedoch die Einstellungen mit dem tatsächlichen Verhalten verglichen werden, dann schlägt sich ein gesteigertes Klimabewusstsein nicht unbedingt in Verhaltensänderungen nieder – weder in Österreich noch international. In anderen Worten: Es besteht das Wissen darüber, dass etwas getan werden muss, aber es wird trotzdem zu wenig unternommen. Bardi und Schwartz (2003) sind der Auffassung, dass Werte und Einstellungen unser Verhalten beeinflussen, aber dass die Beziehung von Einstellungen und tatsächlichem Verhalten durch gesellschaftliche Normen verdeckt wird. Soziale Beziehungen und soziale Netzwerke wiederum haben bedeutenden Einfluss auf die Ausprägung dieser gesellschaftlichen und individuellen Normen und Werte (Christie et al., 2010).

Bisher wurde das Verhältnis von Klimabewusstsein und tatsächlichem Verhalten jedoch kaum systematisch untersucht (Grothmann und Patt, 2005). Für die Forschung über Klimaschutz-Maßnahmen ist das aber vor allem deshalb wichtig, weil die subjektiven Ansichten der Menschen über ihre Möglichkeiten vielfach vom objektiven Handlungspotenzial abweichen können. Infolge dessen kann die Anpassungsfähigkeit an Klimaveränderungen von den AkteurInnen überschätzt werden (Grothmann und Patt, 2005). Zudem können Anpassungsmaßnahmen die Einstellungen von Individuen oder Gruppen auch negativ beeinflussen, vor allem dann, wenn sie von anderen bestimmt werden und mit Einschränkungen verbunden sind (O'Brien, 2009). Individuen beginnen dann klimabewusst zu handeln, wenn sie sehen, dass diese Strategien positive Auswirkungen auf sie selbst, die Gesellschaft und ihre Umwelt haben und auch eine emotionale Beziehung besteht, also persönliche Betroffenheit betreffend des Klimawandels vorliegt. Zudem reicht es nicht, die Menschen nur über die Auswirkungen des Klimawandels zu informieren, sondern sie müssen auch tatsächlich eingebunden werden und das Gefühl bekommen, sie können an einem gesellschaftlichen Wandel teilhaben (Patchen, 2006). Aber selbst wenn Personen umweltbewusst handeln möchten, kann ein zu geringes Einkommen dazu führen, dass sie sich energiesparende Produkte und Dienstleistungen nicht leisten können (Kopatz et al., 2010).

Personal Efficacy & fehlende Bereitschaft, sich von Energieüberfluss zu verabschieden

Bewusstseinsbildung und entsprechende Änderungen im Verbraucherverhalten gehören zu den zentralen Komponenten in den meisten Ansätzen zur Überwindung von Barrieren bei der Umsetzung von Anpassungs- und Emissionsminderungsstrategien (Foti et al., 2008). Auf persönlicher Ebene wird der Klimawandel vielfach als geographisch und zeitlich entferntes Risiko wahrgenommen (Cogoy und Steininger, 2007). Darüber hinaus fehlt das Vertrauen in den persönlichen Wirkungsgrad und die Sinnhaftigkeit von Einzelmaßnahmen, die vielfach nur als sprichwörtlicher Tropfen auf dem heißen Stein wahrgenommen werden. Der wahrgenommene Wirkungsgrad zählt jedoch zu den primären motivationalen Faktoren, wenn es darum geht, konkrete Maßnahmen zu setzen (Bowman, 2008). Neue Formen der Kommunikation und Zusammenarbeit über elektronische Medien steigern diesen Wirkungsgrad, etwa durch die effektive und bei Bedarf auch spontane Koordination von Einzelaktivitäten, Bildung von Interessens- und Aktionsgemeinschaften unabhängig von geographischer

Box 1.7: Human- und Sozialkapital im Kontext Klimawandel (Quelle: Adger, 2003)
Box 1.7: Human and social capital in the context of climate change (Source: Adger, 2003)

Humankapital umfasst den Produktionsfaktor Arbeitskraft, die menschliche Gesundheit, relevantes Wissen sowie die Fähigkeit und Motivation, dieses Wissen umzusetzen – zum Beispiel im Rahmen von Klimaschutz-Maßnahmen, wenn Menschen ihre individuellen Fähigkeiten nützen, um frühzeitige Warnsignale zu erkennen oder um andere Menschen in Klimaschutz-Maßnahmen auszubilden.

Sozialkapital sind jene gesellschaftlichen Strukturen, Institutionen, Netzwerke und Beziehungen, die einzelne Personen innerhalb der Gesellschaft miteinander verbinden, und die es einer Person ermöglichen, ihr Humankapital zu erhalten, zu steigern und auszuschöpfen. Sozialkapital ermöglicht es effizienter und schneller zu handeln, vor allem im Umgang mit unvorhergesehenen Ereignissen, die nicht isoliert von der Gesellschaft betrachtet werden können. Sozialkapital hat private (Familie, FreundInnen) und öffentliche Elemente (Vereine, Gewerkschaften etc.), wobei letztere entscheidende Faktoren für die Anpassungsfähigkeit einer Gesellschaft an sich wandelnde Bedingungen und die Handlungsfähigkeit von Institutionen um auf die Risiken und Chancen des Klimawandels zu reagieren sind.

Nähe, Austausch von umweltrelevantem Wissen über elektronische Plattformen, oder Eco-Feedback-Technologien um die aggregierte Wirkung einer Vielzahl von Einzelmaßnahmen aufzuzeigen und damit zu weiteren Verhaltensänderungen zu motivieren.

Wahrnehmung von Veränderung und die Bereitschaft zur Anpassung

Die Durchführung von Anpassungsmaßnahmen wird eher durch die Variabilität des Klimas (jahreszeitliche und unterjährliche Schwankungen sowie Extremereignisse) ausgelöst als durch langfristige klimatische Veränderungen (Berrang-Ford et al., 2011). Dramatischere und beobachtbare Veränderungen werden eher als Nachweis des Klimawandels wahrgenommen, denn als Trendveränderungen, was in der sozialwissenschaftlichen Literatur als Availability Heuristic (Tversky und Kahneman, 1974) bezeichnet wird. Werden diese Ereignisse zudem durch die Medien vermittelt, steigt die persönliche Wahrnehmung derselben und die Wahrscheinlichkeit zu Anpassungshandlungen nimmt zu (Lorenzoni und Hulme, 2009; Moser, 2010).

1.4.4 Technologische Barrieren

In der internationalen Literatur finden sich zahlreiche Publikationen, aus denen direkt oder indirekt der Schluss gezogen werden kann, dass das Erreichen von Emissionszielen wie den Kyoto-Zielvorgaben nicht an mangelnden technologischen Lösungen scheitern wird (Akashi and Hanaoka, 2012; Delucchi and Jacobson, 2011; GEA, 2012; Grubb, 2004; Jacobson and Delucchi, 2011; Kettner et al., 2011b; Pacala and Socolow, 2004; WBGU, 2011). Andere Studien hingegen zeigen technische und ökonomische Einschränkungen dieser Lösungen auf, die hier im weiteren Sinn als technologische Barrieren diskutiert werden.

Erreichbarkeit niedriger Stabilisierungsziele

Politische Vorgaben, wie beispielsweise seitens der Europäischen Kommission oder im Copenhagen Accord festgehalten, formulieren ein 2 °C-Ziel bis zum Jahr 2100 gegenüber dem vorindustriellen Zeitalter (vgl. Abschnitt 1.1.1 und 1.1.2; EK, 2007; UNFCCC, 2009). Minderungsszenarien, welche die THG-Konzentration deutlich unter dem Business-as-Usual-Emissionspfad reduzieren, werden als niedrige Stabilisierungsszenarien (Low Stabilization Scenarios) bezeichnet. Die Erreichbarkeit (Feasibility) solcher Emissionspfade umfasst die technische, ökonomische und politische Machbarkeit (Knopf et al., 2011). Ein Stabilisierungsziel ist technisch unerreichbar, wenn laut Modellsimulationen keine Szenarien existieren, die mit diesem Ziel konsistent sind. Ein Reduktionsziel ist ökonomisch und politisch unerreichbar, wenn ökonomische Kosten oder politische Barrieren die Zielerreichung verhindern.

Die technische Erreichbarkeit erfordert eine Analyse des möglichen technologischen Wandels im Energiesystem, hinsichtlich Kapitalerneuerung, Marktdurchdringung unterschiedlicher Technologien sowie unter Berücksichtigung von Pfadabhängigkeiten im Energiesystem. Übersteigen die globalen Emissionen 2050 10.5 Gt C / Jahr, oder ist der kohlenstoff-

freie Primärenergieanteil unter 50 %, kann das 550 ppm CO_2-Äq. Ziel mit heute bereits bekannten Technologien nicht mehr erreicht werden (O'Neill et al., 2010).

Andere Studien sehen die technische Erreichbarkeit niedriger Reduktionsziele mittels erneuerbarer Energie, Effizienzverbesserungen und CCS gegeben (–50 % ggü. 1990; Akashi und Hanaoka, 2012). Jacobsen und Delucchi (2011) beurteilen eine Energiebereitstellung mit Wind, Wasser und Solarkraft bis 2030 als technisch und ökonomisch machbar, sie identifizieren primär soziale und politische Barrieren. Im Gutachten des WBGU (2011) wird aufgezeigt, „dass die technologischen Potenziale zur umfassenden Dekarbonisierung vorhanden sind". Ebenso zeigen Pacala und Socolow (2004), dass das Klimaproblem mit derzeitigen Technologien lösbar ist.

Einschränkungen der Erreichbarkeit

Einschränkungen, um gesetzte Ziele mit bereits vorhandenen Technologien zu erreichen, finden sich vor allem in der Frage, ob der geforderte Wandel rasch genug von statten gehen kann (O'Neill et al., 2010). Darüber hinaus wird die technische und ökonomische Erreichbarkeit einer weltweiten erneuerbaren Energiebereitstellung durch die zeitliche Variabilität der Verfügbarkeit von Wind und Strahlung in Frage gestellt, wodurch erhebliche Überschusskapazitäten notwendig werden (Trainer, 2012). Als dritte wesentliche Barriere bei der Verfolgung von Klimaschutzzielen wird schließlich die Versuchung angeführt, die Hoffnung auf eine sogenannte Silver Bullet zu setzen, eine radikale bahnbrechende Technologie, die die geforderten Probleme ohne tiefgreifender Veränderungsprozesse lösen könnte (Grubb, 2004; Pinkse und Kolk, 2010).

Inadäquate energiepolitische Signale

Ohne politische Unterstützung der Entwicklung und Implementierung neuer kohlenstofffreier Technologien werden die angestrebten Reduktionsziele bis 2050 nicht erreichbar sein, ferner sollten solche technologiepolitischen Maßnahmen mit Politikinstrumenten zur korrekten Bepreisung fossiler Energieträger ergänzt werden (Azar und Sandén, 2011).

Weitere Barrieren bei der Dekarbonisierung stellt ein niedriger „Energy Return On Investment" (EROI) von erneuerbaren Energieträgern im Vergleich zu fossilen dar (Murphy und Hall, 2010; Dobbs et al., 2011). Zudem werden Investitionen in erneuerbare Energieoptionen als mit höheren Risiken verbunden wahrgenommen (Dobbs et al., 2011).

Auch bei Atomenergie ist der EROI niedrig und zudem, wie nach dem Reaktorunfall in Fukushima ersichtlich, mit erheblichen Risiken verbunden. CCS befindet sich derzeit erst im Entwicklungsstadium und weist Risiken hinsichtlich des plötzlichen Entweichens von CO_2 bei der Lagerung auf (Lilliestam et al., 2012b). Beide Technologien erschweren eine entschiedene Umsetzung anderer Dekarbonisierungsstrategien (WBGU, 2011).

Zusammenfassend kann auf Basis der Literatur festgestellt werden, dass mit vorhandenen Technologien massive Emissionsreduktionen realisierbar sind und dass Technologien für die zunächst dringlich erforderlichen Umsetzungsschritte von Klimastrategien derzeit keine Barrieren darstellen. Unbestritten ist dabei, dass eine erhöhte Innovationsrate den Klimaschutz erleichtern würde. Unsicher bleibt hingegen, ob derzeit bekannte Technologien ausreichen, um die Ziele zur Gänze zu erreichen, da dies von einer Vielzahl komplex miteinander verbundener Faktoren und nicht-technischer Entwicklungen abhängt. In der Literatur wird auch darauf hingewiesen, dass sogenannte Lock-in-Situationen bei der Wahl von Technologien und bei der weiteren Entwicklung von Infrastrukturen zu vermeiden sind.

1.4.5 Fehlendes Wissen bzw. Unsicherheiten

Unsicherheiten bzgl. Vulnerabilitätsabschätzungen

Ein zentrales Konzept in der Klimaschutz-Politik und der Forschung über den Klimawandel ist jenes der Vulnerabilität. Das UNFCC fordert die entwickelten Länder dazu auf, „die für die nachteiligen Auswirkungen der Klimaänderungen besonders anfälligen Vertragsparteien, die Entwicklungsländer, außerdem dabei [zu unterstützen], die durch die Anpassung an diese Auswirkungen entstehenden Kosten zu tragen" (United Nations, 1992, eigene Übersetzung). In der Forschung wird daher versucht Instrumente zu entwickeln, um die Vulnerabilität einzelner Länder, Regionen, Sektoren und Menschengruppen unter den Bedingungen des Klimawandels zu evaluieren. Eine Vielzahl dieser Versuche standardisierte Vunerability Assessments zu entwickeln, werden jedoch kritisiert (Eriksen and Kelly, 2006; Barnett et al., 2008; Klein, 2009; Hinkel, 2011).

Definitionen, Methoden und konzeptuelle Rahmen sind unter anderem von Adger (2006), Eakin und Luers (2006) sowie von Wolf et al. (2010) diskutiert worden. Die Ungewissheit und Ungenauigkeit bei Vulnerabilitätsabschätzungen lässt sich auf die vage und inkonsistente Definition von Vulnerabilität und damit verbundener Konzepte (Anpassungskapazität, Sensitivität) zurückführen (Adger, 2006; Hinkel, 2008; Ionescu et al., 2009; Wolf et al., 2010). Einige Forschende sind der

Auffassung, dass Vulnerabilität nicht gemessen werden kann (Moss et al., 2001; Patt et al., 2008). Zudem werden die methodischen Schritte bei der Entwicklung von Vulnerabilitätsindikatoren oft nicht transparent dargestellt (Gallopin, 1997; Eriksen und Kelly, 2006, Klein, 2009). Ein weiteres Problem liegt darin, dass bei Vulnerabilitätsabschätzungen Annahmen über zwei eng miteinander verbundene Prozesse getroffen werden müssen: den Klimawandel mit seinen Folgen und sozioökonomische Veränderungsprozesse (demographische, soziale, wirtschaftliche und technologische Entwicklungen, die sich wiederum gegenseitig beeinflussen). Letztere Veränderungen werden allerdings meist nicht ausreichend berücksichtigt (Berkhout et al., 2002).

Unzureichendes Human- und Sozialkapital um mit Änderungen umzugehen

Unsere Gesellschaft verfügt über das Potenzial sich an Veränderungen, wie den aktuellen Klimawandel, anzupassen. Dieses Potenzial kann als die Fähigkeit kollektiv zu handeln verstanden werden (Adger, 2003). Im Kontext der Anpassung an den Klimawandel sind Human- und Sozialkapital Schlüsselfaktoren, die es erlauben, politische Zielsetzungen zu erreichen (Porrit, 2007). Damit die Bedeutung von Human-, bzw. Sozialkapital erkannt wird und es erhöht werden kann, bedarf es ausreichender Information darüber, was unter diesen Kapitalformen zu verstehen ist und ein Bewusstsein darüber, welche Bedeutung ihnen zukommt. Maßnahmen, die diese Kapitalien erhöhen, sind oft niederschwellig und recht günstig (etwa ehrenamtliche HelferInnen bei Hitzeperioden in Städten, welche alte alleinstehende Menschen besuchen; Solidaritätsplan bei Extremereignissen; Stärkung des Vereinslebens in einer ländlichen Gemeinde). Das ACRP Projekt Capitaladapt -Klimanetz beschäftigt sich mit diesen Themen und erprobt die Entwicklung von Maßnahmen zur Steigerung von Human- und Sozialkapital in zwei österreichischen Gemeinden.[32]

Fehlendes Wissen seitens der Entscheidungstragenden

Selbst wenn wissenschaftliche Ergebnisse vorliegen, gelangen diese aufgrund inadäquater Kommunikationskanäle zwischen Wissenschaft und Politik (sowie zwischen unterschiedlichen Ländern und Regionen) oftmals nicht zur Umsetzung (Clar et al., 2012). Eine wesentliche Barriere bei der Dekarbonisierung stellt etwa das fehlende Wissen über die Kohlenstoffintensität relevanter Technologien, sowie über den Stand des technologischen Fortschritts dar (van den Bergh, 2011). Weiters sind die komplexen Zusammenhänge des Erdsystems z. B. über sogenannte Tipping Points (Kipppunkte) und deren Folgen (Verkleinerung der Polkappen, Reduktion der Flächen mit Permafrost, Verwüstung des Amazonasgebiets, Greening of the Sahara) zu wenig bekannt. Werden aber diese Schwellwerte permanent überschritten, können irreversible Prozesse mit weitreichenden Konsequenzen in Gang gesetzt werden (Rockström et al., 2009).

1.4.6 Ansätze zur Überwindung der Barrieren

Tabelle 1.11 stellt die wesentlichen Barrieren sowie möglich Ansätze zur Überwindung derselben dar.

[32] Vbl. www.klimanetz.at

Tabelle 1.11 Barrieren von Anpassung und Emissionsminderung und Ansätze zu deren Überwindung

Table 1.11 Barriers to adaptation and mitigation and approaches to overcome them

	Barriere	Exemplarische Ansätze zur Überwindung der Barriere
	GOVERNANCE	
1.1	Kurze politische Entscheidungshorizonte: sofort wirksame Kosten von Klimaschutz im Widerspruch zu langfristigen Auswirkungen des Klimawandels	Systemischer Ansatz zu Ressourcenmanagement (Dobbs et al., 2011), Transparenz bei Entscheidungssituationen (Held et al., 2007), Veränderung der Diskontierungsraten (Arrow et al., 2004) (siehe 1.2)
1.2	Verwendung hoher Diskontierungsraten für zukünftige Schäden des Klimawandels im Rahmen von Entscheidungsprozessen	Berücksichtigung in den ökonomischen Methoden der Budget-Ansätze (Arrow et al., 2004)
1.3	Politische, institutionelle und ökonomische Pfadabhängigkeiten, Interessensstrukturen sowie VetospielerInnen erschweren den Übergang zu einer nachhaltigen Gesellschaft	Transitionsforschung zur Identifikation von Interessensstrukturen und von „akzeptablen" Lösungen (WBGU, 2011), erhöhte Transparenz bei Entscheidungen (Held et al., 2007)
1.4	Inadäquate Koordination zwischen Energiepolitik und anderen Politikfeldern hinsichtlich Klimaschutz (Verkehr, Landwirtschaft, Tourismus, Raumplanung, Industrie etc.) – führt beispielsweise zu Raumnutzung ohne Rücksicht auf Energiefolgen	Lernende Herangehensweise bei institutionenübergreifenden Steuerungsgruppen (Nilsson und Swartling, 2009), Forschung zu für den Klimaschutz adäquaten Zuständigkeiten und zu Veränderung der institutionellen Mindsets (Dobbs et al., 2011)
1.5	Inadäquate Koordination zwischen unterschiedlichen EntscheidungsträgerInnen (Bund, Land, Gemeinden, Energieversorger, KleinanbieterInnen etc.)	Lernende Herangehensweise bei institutionenübergreifenden Steuerungsgruppen (Nilsson und Swartling 2009), Forschung zu für den Klimaschutz adäquaten Zuständigkeiten und zu Veränderung der institutionellen Mindsets (Dobbs et al., 2011)
1.6	Direkte und indirekte Förderungen energieintensiver Produkte, Dienstleistungen und Infrastrukturen (z. B. durch Subventionen auf Exploration, Förderung von CO_2-intensiven Anpassungsmaßnahmen, ungenügende Planungssicherheit für Erneuerbare z. B. hinsichtlich Einspeisetarife)	Überarbeitung des Förderinstrumentariums, Forschung zu einem systemischen Ansatz des Ressourcenmanagements und dessen Nutzung für politische Entscheidungssituationen (Dobbs et al., 2011)
1.7	Preise der Energieträger bzw. von Gütern und Dienstleistungen spiegeln nicht deren treibhausrelevante Kohlenstoffbilanz wider	Ökologische Steuerreform (Verschiebung der Steuerlast von Arbeit auf Energie) (Bosquet, 2000), Förderung erneuerbarer alleine birgt die Gefahr des Green Paradox (Sinn, 2008; van den Bergh, 2012)
1.8	Folgen des Klimawandels sind vor allem in Entwicklungsländern spürbar, wo die Anpassungskapazitäten niedrig sind und die Verantwortung der Industrieländer für ihren Beitrag zu vergangenen THG-Emissionen gering ist.	Verstärkung des österreichischen Engagements z. B. in den Initiativen der Europäischen Union (z. B. Ressourcenstrategie)
1.9	Mangelnde Kompetenzen bei Planungsaufgaben z. B. im Verkehrswesen, unzureichende Kenntnisse der realen Systemwirkungen	Forschung in Systemwirkungen, Emissionsminderung von Lock-in Situationen und Anpassung der Ausbildung
	WIRTSCHAFTLICHE BARRIEREN	
2.1	Barrieren bei der Dekarbonisierung des Wirtschaftssystems, beispielsweise in Form einer mächtigen Bauindustrie, die gemeinsam mit Banken agiert; Netzwerke von Abhängigkeiten, welche nicht nur innerhalb der Wirtschaft bestehen, sondern auch in die staatliche Verwaltung reichen etc.	Schaffung einer besseren Wissengrundlage über die Dynamik von Innovationsystemen, um deren zentrale AkteurInnen, Netzwerke, und Strukturen, um politische Interventionspunkte identifizieren zu können (Bergek et al., 2008); Verschiebung des Fokus von unternehmerischen Entscheidungen von Arbeits- und Kapitalproduktivität auf Ressourcenproduktivität (Dobbs et al., 2011)
2.2	EigentümerInnen-NutzerInnen-Dilemma: Investitionen zur Energieeinsparung sind z. B. für EigentümerInnen von Büroflächen nicht rentabel, da diese die Kosten oft nicht auf die NutzerInnen übertragen können, obwohl diese daraus einen finanziellen Vorteil ziehen (z. B. thermische Althaussanierung)	Verpflichtender Energieausweis für vermietete Objekte, Mietregulierungen in Abhängigkeit vom Energieverbrauch (Schleich und Gruber, 2008)

	Barriere	Exemplarische Ansätze zur Überwindung der Barriere
2.3	Carbon Leakage Effekte: Emissionsreduktion in stärker dem Klimaschutz verpflichtenden Ländern / Regionen führt zu Emissionszunahmen in weniger stark verpflichteten Ländern / Regionen	International abgestimmte Vorgehensweise bei der Bepreisung von THG (Dobbs et al., 2011; van den Bergh, 2012) oder internationale Kooperation bei der Reduktion von THG (Dobbs et al., 2011); sollte internationale Abstimmung unmöglich sein, Anti-Leakage Politik in Form von Importsteuern auf THG oder allenfalls auch Exportsubventionen (van Asselt und Brewer, 2010).
2.4	Rebound Effekte: effizientere Technologien führen zu Kosteneinsparungen, dadurch freigewordene finanzielle Ressourcen werden für mehr oder andere energieintensive Produkte oder Dienstleistungen ausgegeben	Koordinierte Herangehensweise der Energiepolitik, z. B. durch gleichzeitige Erhöhung der Energiesteuer oder Einführung einer CO2-Steuer (Hanley et al., 2009)
	SOZIALE BARRIEREN	
3.1	Diskrepanz zwischen Umweltbewusstsein und umweltbewussten Handeln (Rollendistanz, fundamentale Attributionsfehler, Mechanismen zur Dissonanzreduktion)	Choice-Editing (Verbot von Produkten und Praktiken, die bei kleinem Nutzen hohe Umweltbelastungen nach sich ziehen), Preissignale (Maniates, 2010)
3.2	neue „Energiearmut“: nur Personen mit ausreichendem Einkommen können sich notwendige Produkte und Dienstleistungen leisten	Anpassung der Sozialpolitik (Kopatz et al., 2010)
3.3	Personal efficacy: Keine Bereitschaft, sich von Energieüberfluss zu verabschieden (derzeit wird Energie nicht als kritische Ressource angesehen, Verfügbarkeit ist selbstverständlich)	Bewusstseinsbildung über Peak oil und Endlichkeit von nicht-erneuerbarer Energie sowie Auswirkungen des eigenen Lebensstils auf sich selbst, andere jetzt lebende Personen und zukünftigen Generationen
3.4	Vorstellung von technologischer Machbarkeit steht einer flexibleren Abstimmung von Angebot und Nachfrage im Weg	Smart Grids die Lernen bei ProduzentInnen und KonsumentInnen fördern
3.5	Extremereignisse führen eher zu Verhaltensänderungen (Anpassung) als graduelle Veränderungen	Aufklärung und Information
	TECHNOLOGISCHE BARRIEREN	
4.1	Langsame Diffusion vorhandener Technologien	Eine entschiedene Klimapolitik kann die Marktdurchdringung stark beschleunigen (WBGU, 2011)
4.2	Zeitliche Variabilität der Verfügbarkeit von Wind und Strahlung	Konzeptualisierung der Technologieentwicklung als öffentliches Gut-Problem, um hier eine rasche Entwicklung von Systeminnovationen, in denen technologische Lösungen eingebettet sind, zu fördern. Für Wind und Strahlung ist hier eine Flexibilisierung der Nachfrage, Smart Grids wie auch Verbesserung der Speichertechnologien zu nennen.
4.3	Hoffnung auf eine „magic bullet“, eine bahnbrechende Technologie, verleitet die Klimapolitik dazu, Entscheidungen über derzeit machbare aber schwer durchzusetzende Dekabonisierungsstrategien aufzuschieben (Beispiele dafür sind Carbon Capture and Storage (CCS), Atomenergie sowie 2nd Generation Biofuels)	Bewertung potentieller „magic bullets“ (inkl. Kosten, EROI [Energy Return On Investment] und Risikoabschätzungen). So ist Atomenergie aufgrund des schlechten EROIs (Energy Return On Investment) sowie hoher Kosten und großer Risiken nicht geeignet. CCS ist derzeit im Entwicklungsstadium (noch keine Pilotanlagen), senkt den Wirkungsgrad des Energiesystems, leakage Probleme scheinen ungelöst, riskante Technologie, hohe Kosten. Auch die Forschung zu 2nd Generation Biofuels haben derzeit noch keine signifikanten Fortschritte erzielt. Zudem bleibt die Flächenkonkurrenz für die Lebensmittelproduktion bestehen. Aus heutiger Sicht sind keine „magic bullets“ zu erwarten.
4.4	EROI (Energy Return On Investment) ist für erneuerbare Energien schlechter (aber auch für unkonventionelle fossile Energieträger)	Gezielte Programme für energieeffizientere Lösungen und zur Nachfragesenkung sind erforderlich (z. B. im Verkehr: Urbane Zentren mit Reduktion des motorisierten Individualverkehrs und kompaktere Siedlungsstrukturen – Stopp der Zersiedelung)

	Barriere	Exemplarische Ansätze zur Überwindung der Barriere
4.5	Autoindustrie setzt weiter auf billige und leichte Energieverfügbarkeit, Beispiel: E-Mobilität	Integrierte Bewertungsansätze von Entwicklungen, die Wirkungen auf nationaler und globaler Systemebene als Referenz heranziehen
	FEHLENDES WISSEN / UNSICHERHEIT	
5.1	Unsicherheiten bzgl. Vulnerabilitätsabschätzungen	Verbesserung der Frühwarnsysteme; Maßnahmen zur Reduktion von Exposure und Sensitivity (Patt et al., 2009; Birkmann, 2006)
5.2	Unzureichendes Human- und Sozialkapital um mit Änderungen umzugehen	Bewusstseinskampagnen betreffend die Bedeutung von Human- und Sozialkapital sowie Unterstützung der Gemeinden bei der Entwicklung von Maßnahmen, die Human- und Sozialkapital stärken (Fraser, 2009; Adger, 2003).
5.3	Fehlendes Wissen über das Erdsystem z. B. über tipping points und deren Folgen (Verkleinerung der Polkappen, Reduktion der Flächen mit Permafrost, Verwüstung des Amazonasgebietes, Greening of Sahara desert etc.)	Globale Modellierung bleibt unsicher, entschiedener Klimaschutz ist die zuverlässigste Maßnahme; Anpassungsmaßnahmen, die robust sind, d. h. auch bei unterschiedlichen konkreten Entwicklungen vorteilhaft sind
5.4	Fehlendes Wissen über die Karbonintensität relevanter Technologien und des technologischen Fortschrittes	Systematischer Aufbau von Datenbanken auf Basis internationaler Kooperationen, und Entwicklung von effektiven Werkzeugen, um auf das in diesen Datenbanken enthaltene Wissen rasch und kontextspezifisch zugreifen zu können
5.5	Wenig Wissen darüber, welche Infrastruktur notwendig bzw. möglich ist, um Energieziele zu erreichen	Forschung zur Verbindung von Energie- und Materialintensität verschiedener Infrastruktursysteme
5.6	grundlegende Irrtümer auf allen Ebenen über Annahmen und Wirkungszusammenhänge, etwa im Fall technischer Verkehrssysteme („Mobilitätswachstum“ das es nicht gibt)	Maßnahmen, Methoden und Technologien, um die Transparenz öffentlicher Kommunikation zu steigern, um falsche oder irreführende Informationen sowie deren Quelle zu identifizieren

1.5 Forschungsbedarf
1.5 Research needs

- Integration von Klimapolitik in andere Politikfelder auf nationaler Ebene (Bund, Länder, Gemeinden) und europäischer Ebene: Fortschritt bezüglich der Integration von Klimapolitik in anderen Politikbereichen (v. a. Energie, Verkehr, Land- und Forstwirtschaft). Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen Instrumenten und Maßnahmen. Bessere Nutzung von Synergien und Verhinderung von Trade-offs.
- Fragen zur Verankerung klimapolitischer Erfordernisse in politischen Entscheidungsprozessen und der öffentlichen Meinungsbildung: Ermittlung von Faktoren (endogenen und exogenen) für eine bessere Verankerung in Politik und öffentlicher Meinung. Identifizierung der zentralen AkteurInnen, die letztlich dafür entscheidend sind, ob Klimapolitik effektiv oder ineffektiv ist.
- Klimapolitikinnovationen: Identifikation von Barrieren und fördernden Faktoren bzw. der Bedingungen klimapolitischer Innovationen. Diffusions- und Lernprozesse über Ländergrenzen hinweg (von anderen Ländern nach Österreich oder vice versa). Ermittlung von Potenzialen und Grenzen der Diffusion von Klimapolitikinnovationen.
- Mögliche Instrumente und Maßnahmen zur Verringerung von Emissionen entlang der Wertschöpfungskette: Reduzierung der zunehmenden Divergenz zwischen Emissionsminderung im Inland (und somit Absinken der produktionsbasierten Emissionen) und importierten Emissionen aus dem Ausland (Zunahme der konsumbasierten Emissionen). Abschätzung der Wechselwirkungen zwischen „Vorreiterrolle“ und „Unilateralität“.
- Untersuchung der Wirksamkeit von kurz- und langfristigen klimapolitischen Maßnahmen auf nationaler und europäischer Ebene („Europa 2020“-Prozess): Stellenwert des Klimaschutzes im „Europa 2020“-Prozess und Erfolg der europäischen Governance diesbezüglich. Ermittlung der Bereiche, wo Mitigationsmaßnahmen langfristige Verhaltensänderungen schaffen, und wo nur kurzfristige Ausweichreaktionen stattfinden.
- Wirksamkeit von Szenarien und Pathways: Geeignete Instrumente und Maßnahmen, um technologische, öko-

nomische und gesellschaftliche Reduktionspotenziale zu erreichen. Gestaltung von Modellen und Szenarien für kurze, mittlere und lange Zeithorizonte hin zu einer „Post Carbon“-Wirtschaft und -Gesellschaft.

- Integration von Anpassung in diverse Politikbereiche: Entstehung eines neuen querliegenden Politikfeldes „Anpassung“ und Bestimmung der institutionellen, akteursstrategischen und diskursiven Wandlungsprozesse. Identifikation von Öffnungsprozessen hin zu neuen politischen und planerischen Lösungen (auch in anderen von Anpassung betroffenen Politikbereichen).
- Von Anpassungsstrategien zu Maßnahmen: Tatsächlicher Erfolg von Regierungen bei der Umsetzung von Anpassungsstrategien. Bestimmung von förderlichen und behindernden Faktoren bezüglich der Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen. Identifikation von Erfolgsbedingungen für erfolgreiche Anpassung.
- Umgang mit Unsicherheiten und Interaktionen zwischen Wissenschaft und Politik bei Entscheidungen: Stärkung der beidseitigen Interaktion von Wissenschaft und Politik. Verbesserung der Wissensbasis von politischen Entscheidungen. Weiterentwicklung von Modellen und Szenarien, um mit Unsicherheiten und Variabilitäten besser umzugehen.
- Soziale Aspekte der Klimaschutz- und Anpassungspolitik: Rolle von politischen, ökonomischen und/oder ethischen Überlegungen bei der Verteilung von Kosten des Klimawandels zwischen unterschiedlich entwickelten und unterschiedlich betroffenen Regionen, u. a. am Beispiel des Green Climate Fund.
- Grenzen der Anpassung für Österreich: Bestimmung der Stärke klimatischer Veränderung (Temperaturänderung, Verschiebung klimatischer Zonen etc.), die zu den Grenzen der Anpassungsfähigkeit führen. Ermittlung welche Klimawandelfolgen (Art bzw. Ausmaß) durch grüne Anpassungsmaßnahmen abgefedert werden können, welche graue Maßnahmen erfordern und welche volkswirtschaftlichen Kosten und Nutzen damit verbunden sind.
- Die Relevanz sozioökonomischer Entwicklungen: Beeinflussung von Kosten des Klimawandels sowie der Anpassung an diesen durch sozioökonomische Veränderungen (demographischer Wandel, Strukturwandel etc.). Einfluss dieser im Vergleich zu Veränderungen der klimatischen Exposition.
- Vereinbarkeit von Energie- und Klimazielen unter Berücksichtigung internationaler Energiemärkte: Formen von Wechselwirkungen zwischen Energiewende, internationalen Energiemärkten und Klimapolitik. Verhinderung von Versorgungsunterbrechungen und -engpässen bei zunehmender Nutzung von erneubarem Strom. Qualifizierung einer Risikostreuung hinsichtlich des Energiemixes aus der Perspektive der Versorgungsicherheit.
- Wechselwirkung zwischen Emissionsminderung (Mitigation) und Klimawandelanpassung (Adaptation): Feststellung des Maßes optimaler Anpassung und deren zeitgerechter Umsetzung. Klärung der Frage, ob ungesteuerte private Anpassung zu signifikanten zusätzlichen Emissionen und Ressourcenverbräuchen führt. Verhinderung von zu viel und zu wenig Anpassung bzw. Vermeidung von Trade-offs zwischen Anpassung und Klimaschutz.
- Finanzpolitische Auswirkungen des Klimaschutzes: Konsequenzen unterschiedlicher Förderinstrumente auf die Volkswirtschaft (sektorale Effekte, Beschäftigung, Einkommensverteilung, Wohlfahrt etc.).
- Sozioökonomische Herausforderungen einer Transformation: Erkenntnisgewinne aus der Übertragung von Best-Practice-Beispielen für die Gestaltung von Rahmenbedingungen, Möglichkeiten sowie Erfolgsfaktoren (Success Factors). Identifikation neuer Grundlagen politischen Handelns und politischer Strukturen, die für eine Transformation ggf. erforderlich sind.
- Innovative Umsetzungsprozesse: Gestaltung von Umsetzungsprozessen für Klimaschutz und Anpassung, so dass alle optimal aus den Fehlern und Erfolgen lernen, und es zu einem Kompetenzaufbau (Capacity Building), Wissenstransfer sowie sozialen Lernprozess kommt. Verwirklichung eines möglichst breiten, integrativen und alle Facetten abdeckenden Anpassungs- und Klimaschutzprozesses. Umgang mit Argumenten der KlimawandelskeptikerInnen.
- Integrative Szenarienentwicklung (angelehnt an IPCC): Identifikation entscheidender Rahmenbedingungen für die Entwicklung sozialer Vulnerabilität und letztlich für die sozialen Kosten des Klimawandels in Österreich. Konsistente Ableitung österreichischer sozioökonomischer Szenarien mit Einbeziehung der Betroffenen, aufbauend auf bestehenden Szenarien.
- Transdisziplinäre Zusammenarbeit und politische Steuerung: Gestaltung des Aufbaus und der Unterstützung sozialer Innovationsprozesse (z. B. neuer Netzwerke). Ablauf der Koordination von Klimapolitik vor dem Hintergrund von Medien-, Interessens- und Machtstrukturen. Sicherstellung von wissensbasierten Entscheidungen auf allen Ebenen. Gestaltung von politischen Steuerungsprozessen für öffentliche und private Anpassung.

1.6 Literaturverzeichnis
1.6 References

Aaheim, A., Amundsen, H., Dokken, T., Wei, T., 2012. Impacts and adaptation to climate change in European economies. Global Environmental Change 22, 959–968. doi:10.1016/j.gloenvcha.2012.06.005

Adger, W.N., 2003. Social Capital, Collective Action, and Adaptation to Climate Change. Economic Geography 79, 387–404.

Adger, W.N., 2006. Vulnerability. Global Environmental Change 16, 268–281.

Adger, W.N., Agrawal, S., Mirza, M.M.W., Conde, C., O'Brien, K.L., Pulhin, J., Pulwarty, R., Smit, B., Takahashi, K., 2007. Assessment of adaptation practices, options, constraints and capacity, in: Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., Hanson, C.E., van der Linden, P.J. (Eds.), Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 719–743.

Akashi, O., Hanaoka, T., 2012. Technological feasibility and costs of achieving a 50 % reduction of global GHG emissions by 2050: mid- and long-term perspectives. Sustain Sci 7, 139–156. doi:10.1007/s11625-012-0166-4

Anderl, M., Bednar, W., Böhmer, S., Gössl, M., Gugele, B., Ibesich, N., Jöbstl, R., Kuschel, V., Lampert, C., Muik, B., Pazdernik, K., Poupa, S., Schachermayer, E., Schneider, J., Seuss, K., Sporer, M., Stranner, G., Storchmann, A., Weiss, P., Wiesenberger, H., Winter, R., Zethner, G., Zechmeister, A., Kommunalkr, edit Public Consulting GmbH, 2010. Klimaschutzbericht 2010 (No. 0267). Umweltbundesamt, Wien.

Anderl, M., Bednar, W., Gössl, M., Göttlicher, S., Gugele, B., Ibesich, N., Jöbstl, R., Köther, T., Kuschel, V., Lampert, C., Neubauer, C., Pazdernik, K., Poupa, S., Purzner, M., Riegler, E., Schneider, J., Seuss, K., Sporer, M., Stranner, G., Storch, A., Weiss, P., Wiesenberger, H., Winter, R., Zechmeister, A., Zethner, G., Kommunalkredit Public Consulting GmbH, 2011a. Klimaschutzbericht 2011 (No. 0334). Umweltbundesamt, Wien.

Anderl, M., Braun, M., Böhmer, S., Gössl, M., Köther, T., Krutzler, T., Lampert, C., Pazdernik, K., Purzner, M., Poupa, S., Sporer, M., Storch, A., Stranner, G., Wiesenberger, H., Weiss, P., Zechmeister, A., Zethner, G., 2011b. GHG Projections and Assessment of Policies and Measures in Austria. Reporting under Decision 280/2004/EC. 15th March 2011 (No. 0331). Umweltbundesamt Wien, Wien.

Anderl, M., Bednar, W., Fischer, D., Gössl, M., Heller, C., Jobstmann, H., Ibesich, N., Köther, T., Kuschel, V., Lampert, C., Neubauer, C., Pazdernik, K., Perl, D., Poupa, S., Purzner, M., Riegler, E., Schenk, C.. Schieder, W., Schneider, J., Seuss, K., Sporer, M., Schodl, B., Stoiber, H., Storch, A., Weiss, P., Wiesenberger, H., Winter, R., Zechmeister, A., Zethner, G., Kommunalkredit Public Consulting GmbH, 2012a. Klimaschutzbericht 2012 (No. 0391). Umweltbundesamt, Wien.

Anderl, M., Freudenschuß, A., Haider, S., Köther, T., Kriech, M., Lampert, C., Pazdernik, K., Poupa, S., Purzner, M., Schodl, B., Stranner, G., Schwaiger, E., Sporrer, M., Weiss, P., Wieser, G., Zechmeister, A., Zethner, G., 2012b. Austria's Annual Greenhouse Gas Inventory 1990-2010, Submissions under Decision 280/2004/EC (0361). Umweltbundesamt, Wien.

Anderl, M., Bednar, W., Gössl, M., Haider, S., Heller, C., Jobstmann, H., Köther, T., Lampert, C., Pazdernik, K., Poupa, S., Rigler, E., Schieder, W., Schindlbacher, S., Schmid, C., Schneider, J., Schmid-Ruzicka, S., Seuss, K., Stranner, G., Storch, A., Weiss, P., Wiesenberger, H., Winter, R., Zechmeister, A., Zethner, G., Kommunalkredit Public Consulting GmbH, 2013. Klimaschutzbericht 2013 (No. 0420). Umweltbundesamt, Wien.

Arrow, K., Dasgupta, P., Goulder, L., Daily, G., Ehrlich, P., Heal, G., Levin, S., Mäler, K.-G., Schneider, S., Starrett, D., Walker, B., 2004. Are We Consuming Too Much? Journal of Economic Perspectives 18, 147–172. doi:10.1257/0895330042162377

Asheim, G.B., Froyn, C.B., Hovi, J., Menz, F.C., 2006. Regional versus global cooperation for climate control. Journal of Environmental Economics and Management 51, 93–109. doi:10.1016/j.jeem.2005.04.004

Azar, C., Sandén, B.A., 2011. The elusive quest for technology-neutral policies. Environmental Innovation and Societal Transitions 1, 135–139. doi:10.1016/j.eist.2011.03.003

Babiker, M.H., 2005. Climate change policy, market structure, and carbon leakage. Journal of International Economics 65, 421–445. doi:10.1016/j.jinteco.2004.01.003

Babiker, M.H., Rutherford, T.F., 2005. The Economic Effects of Border Measures in Subglobal Climate Agreements. The Energy Journal Volume 26, 99–126.

Bardi, A., Schwartz, S.H., 2003. Values and Behavior: Strength and Structure of Relations. Pers Soc Psychol Bull 29, 1207–1220. doi:10.1177/0146167203254602

Barker, T., Junankar, S., Pollitt, H., Summerton, P., 2007. Carbon leakage from unilateral Environmental Tax Reforms in Europe, 1995–2005. Energy Policy 35, 6281–6292. doi:10.1016/j.enpol.2007.06.021

Barnett, J., Lambert, S., Fry, I., 2008. The Hazards of Indicators: Insights from the Environmental Vulnerability Index. Annals of the Association of American Geographers 98, 102–119. doi:10.1080/00045600701734315

Barrett, S., 1994. Self-Enforcing International Environmental Agreements. Oxford Economic Papers 46, 878–94.

Barrett, S., 2003. Environment and Statecraft : The Strategy of Environmental Treaty-Making: The Strategy of Environmental Treaty-Making. Oxford University Press.

Bauer, A., Feichtinger, J., Steurer, R., 2012. The Governance of Climate Change Adaptation in 10 OECD Countries: Challenges and Approaches. Journal of Environmental Policy & Planning 14, 279–304. doi:10.1080/1523908X.2012.707406

Bednar-Friedl, B., Kulmer, V., Schinko, T., 2012. The effectiveness of anti-leakage policies in the European Union: results for Austria. Empirica 39, 233–260. doi:10.1007/s10663-012-9186-7

Bergek, A., Jacobsson, S., Carlsson, B., Lindmark, S., Rickne, A., 2008. Analyzing the functional dynamics of technological innovation systems: A scheme of analysis. Research Policy 37, 407–429. doi:10.1016/j.respol.2007.12.003

Berkhout, F., Hertin, J., Jordan, A., 2002. Socio-economic futures in climate change impact assessment: using scenarios as „learning machines". Global Environmental Change 12, 83–95. doi:10.1016/S0959-3780(02)00006-7

Berrang-Ford, L., Ford, J.D., Paterson, J., 2011. Are we adapting to climate change? Global Environmental Change 21, 25–33. doi:10.1016/j.gloenvcha.2010.09.012

BGBl, 1995. 477. Übereinkommen zum Schutz der Alpen (Alpenkonvention) samt Anlage.

BGBl, 1999. 149. Bundesverfassungsgesetz für ein atomfreies Österreich.
BGBl, 2002. 149. Bundesgesetz: Ökostromgesetz sowie Änderung des Elektrizitätswirtschafts- und -organisationsgesetzes (ElWOG) und das Energieförderungsgesetzes 1979 (EnFG).
BGBl, 2008a. 113. Bundesgesetz, mit dem das Wärme- und Kälteleitungsausbauge setz erlassen und das Energie-Regulierungsbehördengesetz geändert wird.
BGBl, 2008b. 111. Bundesgesetz, mit dem Bestimmungen auf dem Gebiet der Kraft-Wärme-Kopplung neu erlassen werden (KWK-Gesetz).
BGBl, 2009a. 251. Vereinbarung gemäß Art. 15a. B-VG zwischen dem Bund und den Ländern über Maßnahmen im Gebäudesektor zum Zweck der Reduktion des Ausstoßes an Treibhausgasen.
BGBl, 2009b. 168. Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, mit der die Kraftstoffverordnung 1999 geände rt wird.
BGBl, 2011a. 144. Bundesgesetz, mit dem ein Bundesgesetz über das Verbot der geologischen Speicherung von Kohlenstoffdioxid erlassen wird und das Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz 2000, das Bundes-Umwelthaftungsgesetz, die Gewerbe ordnung 1994 sowie das Mineralrohstoffgesetz geändert werden.
BGBl, 2011b. 106. Bundesgesetz zur Einhaltung von Höchstmengen von Treibhausgasemissionen und zur Erarbeitung von wirksamen Maßnahmen zum Klimaschutz (Klimaschutzgesetz – KSG).
BGBl, 2011c. 75. Bundesgesetz über die Förderung der Elektrizitätserzeugung aus erneuerbaren Energieträgern (Ökostromgesetz 2012 – ÖSG 2012).
Biesbroek, G.R., Swart, R.J., Carter, T.R., Cowan, C., Henrichs, T., Mela, H., Morecroft, M.D., Rey, D., 2010. Europe adapts to climate change: Comparing National Adaptation Strategies. Global Environmental Change, Governance, Complexity and Resilience 20, 440–450. doi:10.1016/j.gloenvcha.2010.03.005
Birkmann, J., 2006. Measuring vulnerability to natural hazards: towards disaster resilient societies. United Nations University, Tokyo; New York.
BMEIA, 2009. Strategischer Leitfaden Umwelt und Entwicklung der österreichischen Entwicklungspolitik. Bundesministerium für europäische und internationale Angelegenheiten Sektion VII – Österreichische Entwicklungs- und Ostzusammenarbeit, Wien.
BMLFUW, 2007a. Richtlinien für das österreichische
JI / CDM-Programm. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
BMLFUW, 2012b. Entwurf. Die österreichische Strategie zur Anpassung an den Klimawandel, Teil 2 – AKTIONSPLAN. Handlungsempfehlungen für die Umsetzung. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
BMLFUW, 2012a. Die österreichische Strategie zur Anpassung an den Klimawandel, Teil 1: Kontext. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
BMLFUW, 2007b. Anpassung der Klimastrategie Österreichs zur Erreichung des Kyoto-Ziels 2008-2012. Vorlage zur Annahme im Ministerrat am 21. März 2007. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
BMLFUW, 2002. Strategie Österreichs zur Erreichung des Kyoto-Ziels. Vorlage zur Annahme durch den Ministerrat am 18.06.2002. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
BMLFUW, 2014. Austria's Sixth National Communication. Federal Minitry of Agriculture and Forestry, Environment and Water Management, Vienna, Austria, Wien.
BMLFUW, BMWFJ, 2010. Energiestrategie Österreich. Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, Bundesministerium für Land-und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
Bodansky, D., 2001. The history of the global climate change regime, in: Luterbacher, U., Sprinz, D.F. (Eds.), International Relations and Global Climate Change, Global Environmental Accords Series. MIT Press, Cambridge, Mass.
Boecker, M.C., 2009. Jugend und die Zukunft der Welt. Ergebnisse einer repräsentativen Umfrage in Deutschland und Österreich „Jugend und Nachhaltigkeit". Bertelsmann Stiftung, Bundesministerium für Europäische und internationale Angelegenheiten, tns emnid, Gütersloh / Wien.
Böhringer, C., Lange, A., Rutherford, T.F., 2010. Optimal Emission Pricing in the Presence of International Spillovers: Decomposing Leakage and Terms-of-Trade Motives (Working Paper No. 15899). National Bureau of Economic Research.
Bosquet, B., 2000. Environmental tax reform: does it work? A survey of the empirical evidence. Ecological Economics 34, 19–32. doi:10.1016/S0921-8009(00)00173-7
Bowman, T., 2008. Summary Report: A Meeting to Assess Public Attitudes about Climate Change. National Oceanic and Atmospheric Administration, George Mason University Center for Climate Change Communications, Silver Spring, Maryland.
Brookes, L., 1990. The greenhouse effect: the fallacies in the energy efficiency solution. Energy Policy 18, 199–201. doi:10.1016/0301-4215(90)90145-T
Butzengeiger-Geyer, S., Köhler, M., Michaelowa, A., 2011. Driving meaningful adaptation action through an adaptation market mechanism. (FNI Climate Policy Perspectives 3). Fridtjof Nansen Institute, Lysaker, Norway.
Carraro, C., Siniscalco, D., 1998. International Institutions and Environmental Policy: International environmental agreements: Incentives and political economy. European Economic Review 42, 561–572. doi:10.1016/S0014-2921(97)00118-9
Cheon, A., Urpelainen, J., Lackner, M., 2013. Why do governments subsidize gasoline consumption? An empirical analysis of global gasoline prices, 2002–2009. Energy Policy 56, 382–390. doi:10.1016/j.enpol.2012.12.075
Christie, I., Jackson, T., Rawies, K., 2010. nternational Dimensions of Climate Change. Report 1.3: Ethical, Social and Behavioral Impacts of Climate Change. (Commissioned as part of the UK Government's Foresight Project on the International Dimensions of Climate Change). Government Office for Science, UK.
Ciscar, J.-C., Iglesias, A., Feyen, L., Szabó, L., Regemorter, D.V., Amelung, B., Nicholls, R., Watkiss, P., Christensen, O.B., Dankers, R., Garrote, L., Goodess, C.M., Hunt, A., Moreno, A., Richards, J., Soria, A., 2011. Physical and economic consequences of climate change in Europe. PNAS 108, 2678–2683. doi:10.1073/pnas.1011612108
Clapp, C., Karousakis, K., Buchner, B., Chateau, J., 2009. National and Sectoral GHG Mitigation Potential (OECD / IEA Climate Change Expert Group Papers). Organisation for Economic Cooperation and Development, Paris.
Clar, C., Prutsch, A., Steurer, R., 2012. Barriers and guidelines in adaptation policy making: Taking stock, analyzing congruence and providing guidance. Presented at the International symposium on „The Governance of Adaptation," Amsterdam, Netherlands, p. 31.
Clarke, L., Edmonds, J., Krey, V., Richels, R., Rose, S., Tavoni, M., 2009. International climate policy architectures: Overview of the

EMF 22 International Scenarios. Energy Economics 31, Supplement 2, S64–S81. doi:10.1016/j.eneco.2009.10.013
Cogoy, M., Steininer, K.W. (Eds.), 2007. The economics of global environmental change: international cooperation for sustainability. Edward Elgar Publishing, Celtenham.
Delta Comission, 2008. Working together with water. A living land builds for its future. Findings of the Deltacomissie 2008. Delta Comission, Netherlands.
Delucchi, M.A., Jacobson, M.Z., 2011. Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part II: Reliability, system and transmission costs, and policies. Energy Policy 39, 1170–1190. doi:10.1016/j.enpol.2010.11.045
Dessai, S., Hulme, M., Lempert, R., Pielke, R., 2009. Do We Need Better Predictions to Adapt to a Changing Climate? Eos, Transactions American Geophysical Union 90, 111–112. doi:10.1029/2009EO130003
Dobbs, R., Oppenheim, J., Thompson, F., Brinkman, M., Zornes, M., 2011. Resource revolution: meeting the world's energy, materials, food, and water needs, McKinsey Sustainability & Resource Productivity Practice. McKinsey Global Institute.
Downing, T.E., 2012. Views of the frontiers in climate change adaptation economics. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change 3, 161–170. doi:10.1002/wcc.157
Downing, T.E., Anthoff, D., Butterfield, R., Ceronsky, M., Grubb, M.J., Guo, J., Hepburn, C.J., Hope, C.W., Hunt, A., Li, A., Markandya, A., Moss, S., Nyong, A., Tol, R.S.J., Watkiss, P., 2005. Social Cost of Carbon: A Closer Look at Uncertainty. Department of Environment, Food and Rural Affairs, London.
Eakin, H., Luers, A.L., 2006. Assessing the Vulnerability of Social-Environmental Systems. Annual Review of Environment and Resources 31, 365–394. doi:10.1146/annurev.energy.30.050504.144352
Ebi, K.L., 2008. Adaptation costs for climate change-related cases of diarrhoeal disease, malnutrition, and malaria in 2030. Global Health 4, 9. doi:10.1186/1744-8603-4-9
Edenhofer, O., Carraro, C., Hourcade, J.-C., Neuhoff, K., Luderer, G., Flachsland, C., Jakob, M., Popp, A., Steckel, J., Strohschein, J., 2009. The Economics of Decarbonization. Report of the RECIPE project. Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam.
Edenhofer, O., Kalkuhl, M., 2011. When do increasing carbon taxes accelerate global warming? A note on the green paradox. Energy Policy 39, 2208–2212.
EEA, 2012. European Environment Information and Observation Network - Eionet [WWW Document]. URL http://www.eionet.europa.eu/ (accessed 11.18.13).
EESI, 2007. Recent Polling on Public Perce ptions of Climate Change, April 2006-2007, Climate Change Fact Sheet. Environmental and Energy Study Institute, Washington D.C.
EK – Europäische Kommission, 2011d. Weißbuch: Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum – Hin zu einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem. (No. KOM / 2011 / 144 endg). Europäische Kommission, Brüssel.
EK – Europäische Kommission, 2009a. Weißbuch. Anpassung an den Klimawandel: Ein europäischer Aktionsrahmen (No. KOM(2009) 147 endgültig). Europäische Kommission, Brüssel.
EK – Europäische Kommission, 2009c. Presseaussendung IP / 09 / 628; Brüssel 23/04/2009: Kommission begrüßt Annahme des Klima- und Energiepakets.
EK – Europäische Kommission, 2009d. Adapting to climate change: towards a European framework for action. Impact Assessment. Commission Staff Working Document accompanying the White paper. (No. SEC(2009) 387 / 2), Brussels.
EK – Europäische Kommission, 2011a. Mitteilung der Kommission an der Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Fahrplan für ein ressourcenschonendes Europa (No. KOM/2011/571endg). Europäische Kommission, Brüssel.
EK – Europäische Kommission, 2011b. Mitteilung der Kommission an der Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Fahrplan für den Übergang zu einer wettbewerbsfähigen CO_2-armen Wirtschaft bis 2050 (No. KOM/2011/112 endg). Europäische Kommission, Brüssel.
EK – Europäische Kommission, 2011c. Mitteilung der Kommission an der Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Energiefahrplan 2050 (No. KOM/2011/885 endg). Europäische Kommission, Brüssel.
EK – Europäische Kommission, 2009b. Guidance document No. 24: River basin management in a changing climate. Common implementation strategy for the water framework directive 2000/60/EC. (No. KOM(2009) 040 endgültig). Europäische Kommission, Brüssel.
EK – Europäische Kommission, 2011e. Commission staff working document. Impact Assessment accompanying document to the Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050. (No. SEC(2011) 288 final). European Commission – Directory-General for Mobility, Brussels.
EK – Europäische Kommission, 2007. Grünbuch der Kommission an den Rat, das Europäische Parlament, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Anpassung an den Klimawandel in Europa – Optionen für Maßnahmen der EU (No. KOM/2007/345 endg). Europäische Kommission, Brüssel.
EK – Europäische Kommission, 2008. Mitteilung der Kommission an der Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. 20 und 20 bis 2020 Chancen Europas im Klimawandel (No. KOM/2008/30 endg). Europäische Kommission, Brüssel.
EK – Europäische Kommission, 2010. European Research Framework Programme – Research on Climate Change. Prepared for the Third World Climate Conference (WCC-3) and the UNFCCC Conference of the Parties (COP-15). European Commission Directorate-General for Research, Brüssel.
EK – Europäische Kommission, 2013. Mitteilung der Kommission an der Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Eine EU-Strategie zur Anpassung an den Klimawandel (No. KOM/2013/216 endg). Europäische Kommission, Brüssel.
Energie-Control Austria, 2012. Ökostrombericht 2012, Bericht der Energie-Control Austria gemäß §52 Abs 1 Ökostromgesetz. Energie-Control Austria, Wien.
Eriksen, S.H., Kelly, P.M., 2006. Developing Credible Vulnerability Indicators for Climate Adaptation Policy Assessment. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 12, 495–524. doi:10.1007/s11027-006-3460-6

European Parliament, European Council, 2009. Decisions adopted jointly by the European Parliament and the Council. Decision No 406/2009/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the effort of Member States to reduce their greenhouse gas emissions to meet the Community's greenhouse gas emission reduction commitments up to 2020. Official Journal of the European Union L 140/136, 13.

Evans, E., Ashley, R., Hall, J., Penning-Rowsell, E., Saul, A., Sayers, P., Thorne, C., Watkinson, A., 2004. Foresight. Future Flodding. Scientific Summary: Volumes I and II. Office of Science and Technology, London.

Fischer, C., Fox, A.K., 2007. Output-based allocation of emissions permits for mitigating tax and trade interactions. Land Economics 83, 575–599.

Foti, J., de Silva, L., McGray, H., Shaffer, L., Talbot, J., Werksman, J., 2008. Voice and Choice: Opening the Door to Environmental Democracy. World Resource Institute, Washington, DC.

Fraser, E., 2009. The house is both empty and sad: Social Vulnerability, Environmental Disturbance, Economic Change and the Irish Potato Famine, in: Patt, A.G., Schröter, D., Klein, R.J.T., de la Vega-Leinert, A., Leemans, R. (Eds.), Assessing Vulnerability to Global Environmental Change: Making Research Useful for Adaptation Decision Making and Policy. Routledge, Taylor & Francis Group, Abingdon, pp. 27–40.

G-20 Leaders, 2009. Leaders' statement: The Pittsburgh Summit [WWW Document]. The Pittsburgh Summit 2009. URL http://www.pittsburghsummit.gov/

Gallopin, G.C., 1997. Indicators and their use: information for decision-making. SCOPE—Scientific Committee on Problems of the Environment International Council of Scientific Unions 58, 13–27.

Gardiner, S.M., 2011. A perfect moral storm: the ethical tragedy of climate change. Oxford University Press, New York.

GEA, 2012. Global Energy Assessment (GEA). Cambridge University Press; International Institute for Applied Systems Analysis, Cambridge; Laxenburg, Austria.

Greenstone, M., Kopits, E., Wolverton, A., 2011. Estimating the Social Cost of Carbon for Use in U.S. Federal Rulemakings: A Summary and Interpretation (Working Paper No. 16913). National Bureau of Economic Research.

Grossmann, W.D., Steininger, K., Grossmann, I., Magaard, L., 2009. Indicators on economic risk from global climate change. Environmental science & technology 43, 6421–6426.

Grothmann, T., Patt, A., 2005. Adaptive capacity and human cognition: the process of individual adaptation to climate change. Global Environmental Change 15, 199–213. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2005.01.002

Grubb, M., 2004. Technology Innovation and Climate Change Policy: an overview of issues and options. KEIO Economic Studies 41, 103–132.

Hall, J.W., Sayers, P.B., Dawson, R.J., 2005. National-scale Assessment of Current and Future Flood Risk in England and Wales. Nat Hazards 36, 147–164. doi:10.1007/s11069-004-4546-7

Hanley, N., McGregor, P.G., Swales, J.K., Turner, K., 2009. Do increases in energy efficiency improve environmental quality and sustainability? Ecological Economics 68, 692–709.

Haug, C., Jordan, A., 2010. Burden sharing: distributing burdens or sharing efforts. Climate Change Policy in the European Union: Confronting the Dilemmas of Mitigation and Adaptation 83–102.

Held, S., Lauvergeon, A., Reiten, E., 2007. Policy Directions to 2050: A Business Contribution to the Dialogues on Cooperative Action (Energy & Climate Focus Area). World Business Council for Sustainable Development, Geneva.

Hinkel, J., 2008. Transdisciplinary knowledge integration: cases from integrated assessment and vulnerability assessment. Wageningen Universiteit.

Hinkel, J., 2011. „Indicators of vulnerability and adaptive capacity": Towards a clarification of the science-policy interface. Global Environmental Change 21, 198–208. doi:10.1016/j.gloenvcha.2010.08.002

Hope, C., 2009. The Costs and Benefits of Adaptation, in: Parry, M.L., Arnell, N., Berry, P., Dodman, D., Frankhauser, S., Hope, C., Kovats, S., Nicholls, R., Satterthwaite, D., Tiffin, R., Wheeler, T. (Eds.), Assessing the Costs of Adaptation to Climate Cahnge: A Review of the UNFCCC and Other REcent Estimates. International Institute for Environment and Development and Grantham Institute for CLimate Change, London.

IBRD, 2012. Turn down the Heat – Why a 4 °C Warmer World Must Be Avoided. A Report for the World Bank by the Potsdam Institute for Climate Impact Research and Climate Analytics. World Bank Publications.

IEA (International Energy Agency), 2012. World Energy Outlook 2012. OECD/IEA, Paris.

Interagency Working Group on Social Cost of Carbon, United States Government, 2010. Technical Support Document: Social Cost of Carbon for Egulatory Impact Analysis Under Executive Order 12866. Interagency Working Group on Social Cost of Carbon, United States Government.

Interagency Working Group on Social Cost of Carbon, United States Government, 2013. Technical Support Document: Technical Update of the Social Cost of Carbon for Egulatory Impact Analysis Under Executive Order 12866. Interagency Working Group on Social Cost of Carbon, United States Government.

Ionescu, C., Klein, R.J., Hinkel, J., Kumar, K.K., Klein, R., 2009. Towards a formal framework of vulnerability to climate change. Environmental Modeling & Assessment 14, 1–16.

IPCC, 2007a. Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger, in: Metz, B., Davidson, O.R., Bosch, P.R., Dave, R., Meyer (Eds.), Klimaänderung 2007: Verminderung Des Klimawandels. Beitrag Der Arbeitsgruppe III Zum Vierten Sachstandsbericht Des Zwischenstaatlichen Ausschusses Für Klimaänderung (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA. Deutsche Übersetzung durch ProClim-, österreichisches Umweltbundesamt, deutsche IPCC-Koordinationsstelle, Bern/Wien/Berlin, 2007.

IPCC, 2007b. Technical Summary. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

IPCC, 2007c. Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland.

IPCC, 2007d. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

IPCC, 2007e. Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment

Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
IPCC, 2007f. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
IPCC, 2011. Annex I: Glossary, Acronyms, Chemical Symbols and Prefixes. In: IPCC. 2011, IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
IPCC, 2012a. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaption. A special Report of Working groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
IPCC, 2012b. Intergovernmental Panel on Climate Change, http://www.ipcc.ch/
IPCC, 2014. Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
Jacobson, M.Z., Delucchi, M.A., 2011. Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part I: Technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials. Energy Policy 39, 1154–1169.
Jakob, M., Marschinski, R., 2012. Interpreting trade-related CO_2 emission transfers. Nature Climate Change 3, 19–23. doi:10.1038/nclimate1630
JI/CDM-Programm, 2013. Ji/CDM-Programm [WWW Document]. URL http://www.publicconsulting.at/kpc/de/home/carbonmanagement/jicdmprogramm/
Kettner, C., Kletzan-Slamanig, D., Köppl, A., 2011a. The EU Emission Trading Scheme. Sectoral Allocation Patterns and the effects of the economic crisis (WIFO Working Papers No. 408/2011). Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung.
Kettner, C., Kletzan-Slamanig, D., Köppl, A., Schleicher, S., Damm, A., Steininger, K.W., Wolkinger, B., Schnitzer, H., Titz, M., Artner, H., Karner, A., 2011b. Restructuring the Austrian Energy System: An Extended Technology Wedges Approach. (WIFO Working Papers No. 385/2011). Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung.
Kettner, C., Kletzan-Slamanig, D., Köppl, A., 2013. The EU Emission Trading Scheme. Sectoral Allocation Patterns and Factors Determining Emission Changes (WIFO Working Papers No. 444/2013). Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung.
Khazoom, J.D., 1980. Economic implications of mandated efficiency in standards for household appliances. The Energy Journal 1, 21–40.
Klein, R.J.T., 2009. Identifying Countries That Are Particularly Vulnerable to the Adverse Effects of Climate Change: An Academic or Political Challenge. Carbon & Climate L. Rev. 2009.
Klimaat en Ruimte, 2007. Towards a climate-proof Netherlands: Summary routeplanner. Centrum National Research Programme Climate changes Spatial Planning, Living with Water, Habiforum and CURNET.
Knopf, B., Luderer, G., Edenhofer, O., 2011. Exploring the feasibility of low stabilization targets. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change 2, 617–626. doi:10.1002/wcc.124
Kopatz, M., Spitzer, M., Christanell, A., 2010. Energiearmut: Stand der Forschung, nationale Programme und regionale Modellprojekte in Deutschland, Österreich und Großbritannien (No. 184). Wuppertal papers.
Köppl, A., Kettner, C., Kletzan-Slamanig, D., Schnitzer, H., Titz, M., Damm, A., Steininger, K., Wolkinger, B., Artner, H., Karner, A., 2011. Energy Transition 2012\2020\2050: Strategies for the Transition to Low Energy and Low Emission Structures. Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung, Wien.
Köppl, A., Reinsberger, K., Schleicher, S., Ibesich, N., Krutzler, T., Lichtblau, G., Schneider, J., Storch, A., Wiesenberger, H., 2012. Reduktionspotential und Sektoraufteilung der Treibhausgase. Bewertung der Maßnahmen für CRF-Sektoren. Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung, Wien.
Kranzl, L., Formayer, H., Haas, R., Kalt, G., Manfred, L., Müller, A., Nachtnebel, H.P., Redl, C., Schörghuber, S., Seidl, R., Stanzel, P., 2010. Ableitung von prioritären Maßnahmen zur Adaption des Energiesystems an den Klimawandel. (Endbericht im Rahmen der Programmlinie: Energie der Zukunft). Wien.
Kuik, O., Hofkes, M., 2010. Border adjustment for European emissions trading: Competitiveness and carbon leakage. Energy Policy 38, 1741–1748. doi:10.1016/j.enpol.2009.11.048
Laing, T., Sato, M., Grubb, M., Comberti, C., 2013. Assessing the effectiveness of the EU Emissions Trading System. Centre for Climate Change Economics and Policy Working Paper No. 126 (Working Paper No. 126). Grantham Institute on Climate Change and the Environment.
Lebensministerium, 2010. Klimaschutzgesetz in Großbritannien: Erfahrungen und Erkenntnisse. Lebensministerium, Wien.
Lemmen, D., Warren, F., Lacroix, J., Bush, E., 2008. From impacts to adaptation: Canada in a changing climate 2007. Government of Canada, Ottawa, Canada.
Lilliestam, J., Battaglini, A., Finlay, C., Fürstenwerth, D., Patt, A., Schellekens, G., Schmidt, P., 2012a. An alternative to a global climate deal may be unfolding before our eyes. Climate and Development 4, 1–4. doi:10.1080/17565529.2012.658273
Lilliestam, J., Bielicki, J.M., Patt, A.G., 2012b. Comparing carbon capture and storage (CCS) with concentrating solar power (CSP): Potentials, costs, risks, and barriers. Energy Policy 47, 447–455. doi:10.1016/j.enpol.2012.05.020
Lorenzoni, I., Hulme, M., 2009. Believing is seeing: laypeople's views of future socio-economic and climate change in England and in Italy. Public Understanding of Science 18, 383–400.
Maniates, M., 2010. Editing out unsustainable behavior, in: Assadourian, E., Amadeo, M., Starke, L., Worldwatch Institute (Washington, D.C.. (Eds.), State of the World 2010. Transforming Cultures. Norton, London, pp. 119–129.
Markandya, A., Armstrong, B.G., Hales, S., Chiabai, A., Criqui, P., Mima, S., Tonne, C., Wilkinson, P., 2009. Public health benefits of strategies to reduce greenhouse-gas emissions: low-carbon electricity generation. The Lancet 374, 2006–2015. doi:10.1016/S0140-6736(09)61715-3
McLure, C.E.J., 2013. Reforming Subsidies for Fossil Fuel Consumption: Killing Several Birds with One Stone. (International Center fo Public Policy Working Paper 13-12). Georgia State University, Atlanta, Atlanta.
Meinshausen, M., Meinshausen, N., Hare, W., Raper, S.C.B., Frieler, K., Knutti, R., Frame, D.J., Allen, M.R., 2009. Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2 °C. Nature 458, 1158–1162. doi:10.1038/nature08017
Moe, E., 2010. Energy, industry and politics: Energy, vested interests, and long-term economic growth and development. Energy 35, 1730–1740. doi:10.1016/j.energy.2009.12.026

Moser, S.C., 2010. Communicating climate change: history, challenges, process and future directions. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change 1, 31–53. doi:10.1002/wcc.11

Moser, S.C., Ekstrom, J.A., 2010. A framework to diagnose barriers to climate change adaptation. PNAS 107, 22026–22031. doi:10.1073/pnas.1007887107

Moss, R.H., Brenkert, A.L., Malone, E.L., 2001. Vulnerability to climate change: a quantitative approach (Prepared for the U.S. Department of Energy. Under Contract DE - AC06 - 76RLO 1830 No. PNNL - SA - 33642). United States of America.

Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., van Vuuren, D.P., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G.A., Mitchell, J.F.B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.J., Stouffer, R.J., Thomson, A.M., Weyant, J.P., Wilbanks, T.J., 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. Nature 463, 747–756. doi:10.1038/nature08823

Müller, A., Redl, C., Haas, R., Türk, A., Liebmann, L., Steininger, K.W., Brezina, T., Mayerthaler, A., Schopf, J., Werner, A., Kreuzer, D., Steiner, A., Mollay, U., Neugebauer, W., 2012. Strategien für Energie-Technologie-Investitionen und langfristige Anforderung zur Emissionsreduktion (EISERN) (Projektendberich). klima + energiefonds, Wien.

Murphy, D.J., Hall, C.A.S., 2010. Year in review – EROI or energy return on (energy) invested. Annals of the New York Academy of Sciences 1185, 102–118. doi:10.1111/j.1749-6632.2009.05282.x

Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grubler, A., Jung, T.Y., Kram, T., La Rovere, E.L., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H.M., Price, L., Riahi, K., Roehrl, A., Rogner, H.-H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S.J., Swart, R., van Rooijen, S., Victor, N., Dadi, Z., 2000. Special Report on Emissions Scenarios: a special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change (No. PNNL-SA-39650). Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA (US), Environmental Molecular Sciences Laboratory (US).

Nilsson, A.E., Gerger Swartling, A., 2009. Social learning about climate adaptation: global and local perspectives, SEI Working Paper. SEI, Stockholm, Sweden.

Nordhaus, W.D., 2007b. To Tax or Not to Tax: Alternative Approaches to Slowing Global Warming. Rev Environ Econ Policy 1, 26–44. doi:10.1093/reep/rem008

Nordhaus, W.D., 2007a. A Review of the Stern Review on the Economics of Climate Change. Journal of Economic Literature 45, 686–702. doi:10.1257/jel.45.3.686

O'Brien, 2009. Do Values Subjectively Define the Limits to Climate Change Adaptation?, in: Adger, W.N., Lorenzoni, I., O'Brien, K.L. (Eds.), Adapting to Climate Change: Thresholds, Values, Governance. Cambridge University Press.

O'Neill, B.C., Riahi, K., Keppo, I., 2010. Mitigation implications of midcentury targets that preserve long-term climate policy options. PNAS 107, 1011–1016. doi:10.1073/pnas.0903797106

Ökonomische Bewertung von Umweltschäden. Methodenkonvention zur Schätzung externer Umweltkosten., 2007. Umweltbundesamt Dessau, Umweltbundesamt Dessau.

Pacala, S., Socolow, R., 2004. Stabilization Wedges: Solving the Climate Problem for the Next 50 Years with Current Technologies. Science 305, 968–972. doi:10.1126/science.1100103

Paltsev, S.V., 2001. The Kyoto Agreement: Regional and Sectoral Contributions to the Carbon Leakage. Energy Journal 22, 53–79.

Parlament, 2011. Klimaschutzgesetz verbessert Kooperation zwischen Bund und Ländern. Parlamentskorrespondenz Nr. 918/2011 [WWW Document]. Republik Österreich Parlament. URL http://www.parlament.gv.at/PAKT/PR/JAHR_2011/PK0918/index.shtml (accessed 11.18.13).

Parry, M., Arnell, N., Berry, P., Dodman, D., Fankhauser, S., Hope, C., Kovats, S., Nicholls, R., Satterthwaite, D., Tiffin, R., Wheeler, T., 2009. Assessing the costs of adaptation to climate change: A review of the UNFCCC and other recent estimates – overview of conclusions. Imperial Collede London, Graham Institute for Climate Change, London.

Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., Co-Authors, 2007. Technical Summary. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Patchen, M., 2006. Public attitudes and behavior about climate change: what shapes them and how to influence them.

Patt, A., Schröter, D., de la Vega-Leinert, A.C., Klein, R.J.T., 2008. Vulnerability research and assessment to support adaptation and mitigation: Common themes from the diversity of approaches, in: Patt, A., Schröter, D., Klein, R.J.T., de la Vega-Leinert, A.C. (Eds.), Assessing Vulnerability to Global Environmental. Earthscan, London, UK, pp. 1–26.

Pinkse, J., Kolk, A., 2009. Challenges and Trade-Offs in Corporate Innovation for Climate Change (SSRN Scholarly Paper No. ID 1507946). Social Science Research Network, Rochester, NY.

Porritt, J., 2007. Capitalism as If the World Matters. Earthscan.

Prutsch, A., Grothmann, T., Schauser, I., McCallum, S., unveröffentlicht. Ten guiding principles for good adaptation to climate change – enabling cross-sectoral, inter-regional, multi-level and multi-actor coordination, Umweltbundesamt, Vienna.

PwC, PIK, IIASA, ECF, 2010. 100% Renewable electricity: a roadmap to 2050 for Europe and North Africa. PriceWaterhouseCoopers.

respACT, 2011. Österreich beschließt bundesweites Klimaschutzgesetz. Ab 2012 verbindliche CO_2-Einsparziele [WWW Document]. URL http://www.trigos.at/site/themen/archiv/article/5494.html (accessed 4.18.14).

Richardson, T., 1997. The Trans-European Transport Network Environmental Policy Integration in the European Union. European Urban and Regional Studies 4, 333–346. doi:10.1177/096977649700400403

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F.S., Lambin, E.F., Lenton, T.M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H.J., Nykvist, B., de Wit, C.A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P.K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R.W., Fabry, V.J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P., Foley, J.A., 2009. A safe operating space for humanity. Nature 461, 472–475. doi:10.1038/461472a

Schleich, J., Gruber, E., 2008. Beyond case studies: Barriers to energy efficiency in commerce and the services sector. Energy Economics 30, 449–464.

Schleicher, S., 2014. Tracing the decline of EU GHG emissions. Impacts of structural changes of the energy system and economic activity. Policy Brief. Schleicher, Stefan P. (2014). Tracing the decline of EU GHG emissions. Impacts of structural changes of the energy system and economic act Wegener Center for Climate and Global Change, Graz., Graz.

Sieferle, R.P., 2010. Lehren aus der Vergangenheit. Expertise für das WBGU-Hauptgutachten „Welt im Wandel: Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation“. Berlin.

Sieferle, R.P., Krausmann, F., Schandl, H., Winiwarter, V., 2006. Das Ende der Fläche. Zum gesellschaftlichen Stoffwechsel der Industrialisierung. Böhlau Verlag, Köln.

Sinn, H.-W., 2008. Public policies against global warming: a supply side approach. Int Tax Public Finance 15, 360–394. doi:10.1007/s10797-008-9082-z

Skjærseth, J.B., Wettestad, J., 2008. Implementing EU emissions trading: success or failure? Int Environ Agreements 8, 275–290. doi:10.1007/s10784-008-9068-4

Smith, B., Burton, I., Klein, R.J.T., Wandel, J., 2000. An Anatomy of Adaptation to Climate Change and Variability. Climatic Change 45, 223–251. doi:10.1023/A:1005661622966

Smith, J.B., Vogel, J.M., Iii, J.E.C., 2009. An architecture for government action on adaptation to climate change. An editorial comment. Climatic Change 95, 53–61. doi:10.1007/s10584-009-9623-1

Smith, M.S., Horrocks, L., Harvey, A., Hamilton, C., 2011. Rethinking adaptation for a 4 °C world. Phil. Trans. R. Soc. A 369, 196–216. doi:10.1098/rsta.2010.0277

Smith, P., Haberl, H., Popp, A., Erb, K., Lauk, C., Harper, R., Tubiello, F.N., de Siqueira Pinto, A., Jafari, M., Sohi, S., Masera, O., Böttcher, H., Berndes, G., Bustamante, M., Ahammad, H., Clark, H., Dong, H., Elsiddig, E.A., Mbow, C., Ravindranath, N.H., Rice, C.W., Robledo Abad, C., Romanovskaya, A., Sperling, F., Herrero, M., House, J.I., Rose, S., 2013. How much land-based greenhouse gas mitigation can be achieved without compromising food security and environmental goals? Glob Change Biol 19, 2285–2302. doi:10.1111/gcb.12160

Steininger, K., Amon, B., Damm, A., Grossmann, W., Heimrath, R., Hörtenhuber, S., Kurzmann, R., Lauer, M., Prettenthaler, F., Steiner, D., 2012. ClimReg – Bundeslandspezifische Technologieszenarien als Entscheidungsgrundlage für eine zukunftsfähige Energienutzung. Final report, Vienna.

Stern, N., 2007. The Economics of Climate Change: The Stern Review. Cambridge University Press.

Steurer, R., Trattnigg, R., 2010. Nachhaltigkeit regieren. Eine Bilanz zu Governance-Prinzipien und -Praktiken. Oekom, München.

Swedish Commission on Climate and Vulnerability, 2007. Sweden facing climate change – threats and opportunities. (Final report from the Swedish Commission on Climate and Vulnerability, Swedish Government Official Reports No. SOU 2007:60). Stockholm, Sweden.

Tol, R.S.J., 2005. The marginal damage costs of carbon dioxide emissions: an assessment of the uncertainties. Energy Policy 33, 2064–2074. doi:10.1016/j.enpol.2004.04.002

Trainer, T., 2012. A critique of Jacobson and Delucchi's proposals for a world renewable energy supply. Energy Policy 44, 476–481. doi:10.1016/j.enpol.2011.09.037

Tuerk, A., Fazekas, D., Schreiber, H., Frieden, D., Wolf, C., 2013. Green Investment Schemes: The AAU market between 2008-2012, Climate Strategies Working Paper.

Tuerk, A., Wagner, F., Prettenthaler, F., Steiner, D., Frieden, D., 2010. Synergies between adaptation and mitigation. Assessing the potential of mutual co-effects („Syndapt“) (SynAdapt, Endbericht No. GZ: A760675).

Tversky, A., Kahneman, D., 1974. Judgment under Uncertainty: Heuristics and Biases. Science 185, 1124–1131. doi:10.1126/science.185.4157.1124

UKCIP, 2005. Identifying Adaptation Options. UKCIP, Oxford.

UNEP, 2010. The Emissions Gap Report – Are the Copenhagen Pledges Sufficient to Limit Global Warming to 2 °C or 1,5 °C? United Nations Environment Programme (UNEP).

UNFCCC, 1992. Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen.

UNFCCC, 1997. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change (Protocol No. UN Doc FCCC/CP/1997/7/Add.1, Dec. 10, 1997; 37 ILM 22 (1998)).

UNFCCC, 2002. Report of the Conference of the Parties on its seventh session, held at Marrakesch from 29 October to 10 November 2001 – Addendum. UN Framework Convention on Climate Change, Conference of the Parties.

UNFCCC, 2006. Report of the Conference of the Parties on its eleventh session, held at Montreal from 28 November to 10 December 2005 – Addendum. UN Framework Convention on Climate Change, Conference of the Parties.

UNFCCC, 2007a. Report of the Conference of the Parties on its thirteenth session, held in Bali from 3 to 15 December 2007. Part One: Proceedings (No. FCCC/CP/2007/6). UN Framework Convention on Climate Change, Conference of the Parties.

UNFCCC, 2007b. Investment and Financial Flows to Address Climate Change. Climate Change Secretariat, Bonn, Germany.

UNFCCC, 2009. Report of the Conference of the Parties on its fifteenth session, held in Copenhagen from 7 to 19 December 2009 Addendum Part Two: Action taken by the Conference of the Parties at its fifteenth session (No. FCCC/CP/2009/11/Add.1). UN Framework Convention on Climate Change, Conference of the Parties.

UNFCCC, 2010a. Fifth National Communication of the Austrian Federal Government in Compliance with the Obligations under the United Nations Framework Convention on Climate Change.

UNFCCC, 2010b. Potential costs and benefits of adaptation options: A review of existing literature (Technical Paper No. FCCC/TP/2009/2/Rev.1). UN Framework Convention on Climate Change, Conference of the Parties.

UNFCCC, 2010c. Synthesis report on efforts undertaken to assess the costs and benefits of adaptation options, and views on lessons learned, good practices, gaps and needs (No. FCCC/SBSTA/2010/3), UN Framework Convention on Climate Change, Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice.

UNFCCC, 2011a. Decision 12/CP.17. Guidance on systems for providing information on how safeguards are addressed and respected and modalities relating to forest reference emission levels and forest reference levels as referred to in decision 1/CP.16 (No. FCCC/CP/2011/9/Add.2). UN Framework Convention on Climate Change, Conference of the Parties.

UNFCCC, 2011b. Decision 7/CP.17. Work programme on loss and damage (No. FCCC/CP/2011/9/Add.2). UN Framework Convention on Climate Change, Conference of the Parties.

UNFCCC, 2012a. Draft decision -/CMP.7. Outcome of the work of the Ad Hoc Working Group on Further Commitments for Annex I Parties under the Kyoto Protocol at its sixteenth session (Advance unedited version). UN Framework Convention on Climate Change, Conference of the Parties.

UNFCCC, 2012b. Report of the Conference of the Parties on Its Seventeenth Session, Held in Durban from 28 November to 11 December 2011 – Addendum. Part Two: Action taken by the Conference of the Parties at its seventeenth session (No. FCCC/CP/2011/9/Add.1) . UN Framework Convention on Climate Change, Conference of the Parties.

UNFCCC, 2012c. Press Release. At UN Climate Change Conference in Doha, governments take next essential step in global response to climate change. UN Framework Convention on Climate Change, Conference of the Parties, Doha.
UNFCCC, 2012d. Meetings, http://unfccc.int/meetings/items/6240.php
UNFCCC, 2012e. Report on the twenty-second meeting of the Least Developed Countries Expert Group (No. FCCC/SBI/201/27). Held in Doha from 26 November to 1 December. UN Framework Convention on Climate Change, Conference of the Parties.
United Nations, 1992. The United Nations Framework Convention on Climate Change.
Van Asselt, H., 2010. Emissions trading: the enthusiastic adoption of an alien instrument?, in: Jordan, A., Huitema, D., Van Asselt, H., Rayner, T., Berkhout, F. (Eds.), Climate Change Policy in the European Union. Cambridge University Press.
Van Asselt, H., Brewer, T., 2010. Addressing competitiveness and leakage concerns in climate policy: An analysis of border adjustment measures in the US and the EU. Energy Policy 38, 42–51. doi:10.1016/j.enpol.2009.08.061
Van den Bergh, J.C.J.M., 2011. Energy Conservation More Effective With Rebound Policy. Environ Resource Econ 48, 43–58. doi:10.1007/s10640-010-9396-z
Van den Bergh, J.C.J.M., 2012. Effective climate-energy solutions, escape routes and peak oil. Energy Policy 46, 530–536. doi:10.1016/j.enpol.2012.04.022
Van Vuuren, D.P. van, Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G.C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S.J., Rose, S.K., 2011. The representative concentration pathways: an overview. Climatic Change 109, 5–31. doi:10.1007/s10584-011-0148-z
Warnstoff, J., 2012. Climate Protection Policy in Federal Countries: Vertical Coordination between Federation and States in Austria, Germany and Switzerland (Diplomarbeit). Universität für Bodenkultur, Institut für Wald-, Umwelt- und Ressourcenpolitik, Wien.
Watkiss, P., 2011. Aggregate economic measures of climate change damages: explaining the differences and implications. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change 2, 356–372. doi:10.1002/wcc.111
Watkiss, P., Hunt, A., 2010. Review of Adaptation Costs and Benefit estimates in Europe (Report prepared for the EEA).
WBGU, 2011. Welt im Wandel: Gesellschaftsvertrag für eine große Transformation Zusammenfassung für Entscheidungsträger. WBGU, Berlin.
WIFO (Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung), Wegener Center für Klima und Globalen Wandel, Energy Economics Group – TU Wien, Institut für Technische Anlagen und Energiewirtschaft, TU Graz, Institut für Prozess- und Partikeltechnik, KWI ConsultantsGmbH, Montanuniversität Leoben, Institut für Werkstoffkunde und Prüfung der Kunststoffe, 2009. Energiestrukturen für 2020. Technisches Basisdokument für die österreichische Energiestrategie, Monographien. WIFO, Wien.
WIFO (Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung), Wegener Center für Klima und Globalen Wandel, Umweltbundesamt, 2012. Reduktionspotential und Sektoraufteilung der Treibhausgase. Bewertung der Maßnahmen für CRF-Sektoren. Wien.
Wolf, S., Hinkel, J., Ionescu, C., Hofman, M., Bisaro, S., Linke, D., Klein, R.J.T., 2010. Vulnerability: a meta-analysis of definitions and methodologies. A clarification by formalisation. Global Environmental Change, under review.
Wolkinger, B., Steininger, K.W., Damm, A., Schleicher, S., Tuerk, A., Grossman, W., Tatzber, F., Steiner, D., 2012. Implementing Europe's climate targets at the regional level. Climate Policy 12, 667–689. doi:10.1080/14693062.2012.669096
World Bank, 2012. Turn down the heat: Why a 4° warmer world must be avoided (A Report for the World Bank by the Potsdam Institute for Climate Impact Research and Climate Analytics), World Bank Publications. International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank.
WWF, Karmasin, 2010. Klimafreundliches Konsumverhalten [WWW Document]. Klimafreundliches Konsumverhalten. URL http://www.wwf.at/de/menu27/subartikel1488/

EU-Rechtstexte:

2001/77/EG: Richtlinie 2001/77/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. September 2001 zur Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen im Elektrizitätsbinnenmarkt, ABl 2001 L 283 vom 27/10/2001, S. 33–40.
2002/91/EG: Richtlinie 2002/91/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2002 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden, ABl L 001 vom 04/01/2003 S. 65–71.
2003/30/EG: Richtlinie 2003/30/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 8. Mai 2003 zur Förderung der Verwendung von Biokraftstoffen oder anderen erneuerbaren Kraftstoffen im Verkehrssektor, ABl L 123 vom 17/05/2003 S. 42–46.
2003/87/EG: Richtlinie 2003/87/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Oktober 2003 über ein System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten in der Gemeinschaft und zur Änderung der Richtlinie 96/61/EG des Rates, ABl L 275 vom 25/10/2003 S. 32–46.
2003/87/EG: Richtlinie 2003/87/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Oktober 2003 über ein System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten in der Gemeinschaft und zur Änderung der Richtlinie 96/61/EG des Rates.
2004/8/EG: Richtlinie 2004/8/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Februar 2004 über die Förderung einer am Nutzwärmebedarf orientierten Kraft-Wärme-Kopplung im Energiebinnenmarkt und zur Änderung der Richtlinie 92/42/EWG, ABl L 052 vom 21/02/2004 S. 50–60.
2005/32/EG Richtlinie 2005/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 6. Juli 2005 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energiebetriebener Produkte und zur Änderung der Richtlinie 92/42/EWG des Rates sowie der Richtlinien 96/57/EG und 2000/55/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, ABl. L 191 vom 22/07/2005, S. 29–58.
2006/32/EG: Richtlinie 2006/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. April 2006 über Endenergieeffizienz und Energiedienstleistungen und zur Aufhebung der Richtlinie 93/76/EWG des Rates, ABl. L 114 vom 27/04/2006, S. 64–85.
2009/125/EG Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte, ABl. L 285 vom 31/10/2009, S. 10–35.
2009/28/EG: Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG, ABl. L 140 vom 05/06/2009, S. 16–62.

2009/29/EG: Richtlinie 2009/29/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Änderung der Richtlinie 2003/87/EG zwecks Verbesserung und Ausweitung des Gemeinschaftssystems für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten, ABl. L 140 vom 05/06/2009, S. 63–87.

2009/30/EG: Richtlinie 2009/30/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Änderung der Richtlinie 98/70/EG im Hinblick auf die Spezifikationen für Otto-, Diesel- und Gasölkraftstoffe und die Einführung eines Systems zur Überwachung und Verringerung der Treibhausgasemissionen sowie zur Änderung der Richtlinie 1999/32/EG des Rates im Hinblick auf die Spezifikationen für von Binnenschiffen gebrauchte Kraftstoffe und zur Aufhebung der Richtlinie 93/12/EWG, ABl. L 140 vom 05/06/2009, S. 88–113.

2009/31/EG: Richtlinie 2009/31/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 über die geologische Speicherung von Kohlendioxid und zur Änderung der Richtlinie 85/337/EWG des Rates sowie der Richtlinien 2000/60/EG, 2001/80/EG, 2004/35/EG, 2006/12/EG und 2008/1/EG des Europäischen Parlaments und des Rates sowie der Verordnung (EG) Nr. 1013/2006, ABl. L 140 vom 05/06/2009, S. 114–135.

2010/31/EU: Richtlinie 2010/31/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden, ABl. L 153 vom 18/06/2010, S. 13–35.

406/2009/EG: Entscheidung Nr. 406/2009/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 über die Anstrengungen der Mitgliedstaaten zur Reduktion ihrer Treibhausgasemissionen mit Blick auf die Erfüllung der Verpflichtungen der Gemeinschaft zur Reduktion der Treibhausgasemissionen bis 2020, ABl. L 140 vom 05/06/2009, S. 136–148.

EG 244/2009: Verordnung (EG) Nr. 244/2009 der Kommission vom 18. März 2009 zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Haushaltslampen mit ungebündeltem Licht, ABl. L 76 vom 24/3/2009, S. 3-16.

EG 443/2009: Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO_2 -Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen, ABl. L 140 vom 05/06/2009, S. 1–15.

1.7 Anhang
1.7 Annex

Tabelle 1.A1 Emissionsminderungsoptionen in Österreich (Köppl et al., 2011)

Table 1.A1 Options for mitigation in Austria (Köppl et al., 2011)

Emissionsminderungsoptionen		Hauptannahmen
Mobilität		
M-1	Effiziente Raumstruktur	Reduzierung der Personenkilometer (pkm) vom motorisierten Individualverkehr durch bessere Raumplanung; Steigerung der pkm im öffentlichen Verkehr
M-2	Ausbau Öffentlicher Verkehr	Verlagerung vom motorisierten Individualverkehr zu öffentlichen Verkehr; Anteil des öffentlichen Verkehrs steigt von 25 % (2005) auf 28 % (2020)
M-3	Ausbau Nicht-motorisierter Individualverkehr	Verlagerung vom motorisierten Individualverkehr zu nicht motorisierten Individualverkehr (Fahrrad und Fußwege)
M-4	Alternative Antriebe	Verlagerung von konventionellen Pkws zu Elektroautos und plug-in Hybridfahrzeugen
M-5	Effizienterer Güterverkehr	Reduzierung der Tonnenkilometer durch Verbesserung des intermodalen Verkehrs, Logistik und Teleinformatik
M-6	Leichtbauweise	Steigerung der Energieeffizienz im motorisierten Individualverkehr durch Leichtbauweise
M-7[1]	Biotreibstoffe erster Generation	Steigerung des Anteils von Biokraftstoffen erster Generation im Treibstoffgemisch für Mobilität
M-8	Verlagerung des Tanktourismus	Angleichen der Treibstoffpreise auf das Niveau der Nachbarländer; Reduktion der Kraftstoffexporte in Fahrzeugtanks
Gebäude		
B-1	Thermische Sanierung	Sanierung des Gebäudebestandes auf Niedrigenergiehausstandard. Steigerung der Sanierungsrate von 1 auf 5 % bis 2020
B-2	Neubau Passivhausstandard	Passivhausstandard (weniger als 15 kWh / m²) für neue Wohnhäuser
B-3a	Heizungstausch	Austausch von mit fossilen Energieträgern befeuerten Heizsystemen auf effizientere Heizsysteme mit erneuerbaren Energieträgern

Emissionsminderungsoptionen		Hauptannahmen
B-3b	Solare Wärme	Steigerung der Solarwärme für Heizung und Warmwasseraufbereitung (von 2,7 PJ 2008 auf 29,4 PJ 2020)
B-4	Eigenstrom durch Photovoltaik	Installation von 354 MWp auf Dächer bis 2020 (von 32 MWp in 2008)
B-5	Energieoptimierte Geräte	Substitution von Haushaltsgeräten auf energieoptimierte Geräte
Produktion		
P-1	Energiebedarf der Produktionsgebäude	Thermische Sanierung von Produktionsgebäuden und Substitution alter Beleuchtung auf effizientere Systeme
P-2	Prozessintensivierung	Effizientere Prozesse und Planung der Anlagen; Nutzung von Abwärme
P-3	Energieeffiziente Antriebe	Austausch von stationären Antrieben durch effizientere Anlagen
P-4	Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)	Austausch von Gasbrennern durch effizientere KWK-Anlagen
P-5	Substitution von fossilien Energieträgern	Substitution von kohle- und ölbasierter Wärmeenergie durch Gasbrenner
P-6	Biomasse für Prozesswärme[2]	Substitution von gasbasierter Wärmeenergie durch Biomasse
P-7	Solare Wärme	Substitution von Gas für Prozesse im Niedertemperaturbereich durch Solarwärme; Nutzung von Solarwärme für Heizung der Produktionsgebäude
Elektrizität und Wärme		
E-1	Windenergie	Substitution von öl- und gasbasierter Stromerzeugung durch Windkraft
E-2	Wasserkraft	Substitution von öl- und gasbasierter Stromerzeugung durch Wasserkraft
E-3	Biomasse- und Biogas KWK	Substitution von öl- und gasbasierter Stromerzeugung durch Biomasse und Biogas KWKs
E-4	Effizienzpotenzial der Energienachfrage	Reduzierung des fossilen Umwandlungseinsatzes durch reduzierte Energienachfrage in den Sektoren Mobilität, Gebäude und Produktion

[1] Kritische Aspekte der Produktion von Biotreibstoffen werden hierbei nicht explizit berücksichtigt, wenngleich die Autoren auf diese Diskussion verweisen. Zum Thema Treibhausgasemissionen von Bioenergieproduktion und Nutzung siehe auch Band 3, Kapitel 2.

[2] Die Emissionswirkungen dieser Maßnahme berücksichtigen potenziell negative Effekte der Biomasseproduktion nicht. Siehe auch Fußnote 28.

Band 3 Kapitel 2: Land- und Forstwirtschaft, Wasser, Ökosysteme und Biodiversität

Volume 3 Chapter 2: Agriculture and Forestry, Water, Ecosystems and Biodiversity

Koordinierende Leitautoren

Josef Eitzinger, Helmut Haberl

LeitautorInnen

Barbara Amon, Bernadette Blamauer, Franz Essl, Veronika Gaube, Helmut Habersack, Robert Jandl, Andreas Klik, Manfred Lexer, Wolfgang Rauch, Ulrike Tappeiner, Sophie Zechmeister-Boltenstern

Beiträge von

Thomas Amon, Gernot Bodner, Thomas Cech, Jürgen Friedel, Johann Glauninger, Thomas Gschwantner, Norbert Kreuzinger, Michael Oberforster, Christoph Plutzar, Erich Pötsch, Martin Schlatzer, Johannes Schmidt, Martin Schönhart, Stefan Schmutz

Für den Begutachtungsprozess

Hermann Lotze-Campen

Inhalt

ZUSAMMENFASSUNG

Für Management, Nutzung und Schutz von terrestrischen und aquatischen Ökosystemen sowie für die nachhaltige Bewirtschaftung der Schlüsselressource Wasser stellt der Klimawandel in vielfacher Hinsicht eine Herausforderung dar. Zwischen Land- und Forstwirtschaft, Wasserwirtschaft und Gewässerschutz sowie der Erhaltung von Ökosystemen und Biodiversität bestehen dabei zahlreiche Wechselwirkungen. Fast alle Maßnahmen zur Treibhausgas (THG)-Reduktion sowie zur Anpassung an den Klimawandel, die in diesen Sektoren getroffen werden können, haben weitere soziale, ökonomische und ökologische Wirkungen zur Folge. Diese Wechselwirkungen können auch die THG-Reduktionspotenziale, die mit einer Maßnahme erzielt werden können, maßgeblich beeinflussen. Dies betrifft u.a. die Frage der bei einem Ersatz von Fossilenergie durch Bioenergie erzielbaren THG-Einsparungen, welche durch systemische Effekte im Bereich der Landnutzung (z.B. Landnutzungsänderungen durch Ausweitung von Anbauflächen) erheblich beeinflusst werden können.

In der Landwirtschaft bestehen Möglichkeiten zur Verringerung der THG-Emissionen besonders in den Bereichen Fütterung von Wiederkäuern, Behandlung von Wirtschaftsdünger, Reduktion von Stickstoffverlusten und Erhöhung der Stickstoffeffizienz. Der Ausbau landwirtschaftlicher Bioenergieproduktion kann u.a. im Rahmen einer Strategie der integrierten Optimierung von Lebensmittel- und Energieproduktion zur kaskadischen Nutzung von Biomasse zur THG-Reduktion beitragen. In der Landwirtschaft besteht Anpassungsbedarf in zahlreichen Bereichen. Kurzfristig können z.B. Bodenbearbeitungsverfahren wie Mulchen oder reduzierte Bodenbearbeitung eingesetzt, trocken- oder hitzeresistente Arten bzw. Sorten verwendet und Anbau- und Bearbeitungszeitpunkte und Fruchtfolgen angepasst werden. Mittelfristig kann z.B. die Bewässerungsinfrastruktur und -technik verbessert, Monitoringsysteme für Schädlinge und Krankheiten eingeführt, trocken- oder hitzeresistente Arten bzw. Sorten gezüchtet, Lagerbestände aufgebaut und Risikoverminderungsstrategien entwickelt werden.

Die Forstwirtschaft stellt auf Grund der hohen Kohlenstoffbestände im Wald einen Schlüsselsektor für die THG-Reduktion dar. Sie kann sowohl durch ihre Funktion als Kohlenstoffsenke, als auch durch Bereitstellung emissionsarmer Rohstoffe bzw. Energie zum Klimaschutz beitragen. Hierbei sind systemische Wechselwirkungen zwischen Senkenfunktion, Produktionsfunktion und anderen ökologischen Funktionen bzw. Dienstleistungen des Waldes zu beachten. Eine integrierte Optimierung von forstlicher Produktion und Nutzungskaskaden verspricht den größten Nutzen. Die Anpassung an den Klimawandel stellt für die Forstwirtschaft auf Grund der langen Planungszeiträume eine besondere Herausforderung dar. Hierbei sind sowohl Verschiebungen von mittleren Niederschlags- und Temperaturwerten, inklusive der damit verbundenen Veränderungen bei forstschädlichen Insekten oder Pilzen, als auch Veränderungen in den Extremereignissen, wie Windwürfen oder Trockenperioden, zu beachten.

In der Wasserwirtschaft selbst gibt es nur geringe Möglichkeiten zur THG-Reduktion. Sehr wohl besteht eine Vielzahl an Herausforderungen durch den Klimawandel, denen am effizientesten mit Adaptationsmaßnahmen begegnet werden kann, die auf interdisziplinären, integrierten Konzepten beruhen. Diese betreffen u.a. Landnutzungsänderungen in den Einzugsgebieten, Vorsorge vor Hoch- und Niederwasser, Geschiebemanagement sowie Maßnahmen in den Bereichen Trinkwasserversorgung und Abwasserreinigung.

Der Klimawandel erhöht den Druck auf Ökosysteme und Biodiversität, die zurzeit bereits durch vielfältige Faktoren wie etwa Landnutzung oder Immissionen belastet sind. Vor allem eine Beseitigung von Wanderungsbarrieren – etwa durch Schaffung eines Lebensraumverbundes – stellt eine wichtige Anpassungsoption dar. Viele Naturschutzmaßnahmen können auch zur THG-Reduktion beitragen, indem sie zu einer Erhöhung der Kohlenstoffsenkenfunktion von Ökosystemen führen. Dies ist etwa beim Schutz bzw. bei der Restaurierung von Mooren oder bei einer Verringerung der Nutzungsintensität in dafür geeigneten Waldgebieten oder Feuchtegebieten der Fall.

Nachfrageseitige Veränderungen, etwa eine Veränderung der Konsumgewohnheiten im Bereich Ernährung sowie Maßnahmen zur Reduktion von Lebensmittelabfällen, können erheblich zur THG-Reduktion beitragen. Vor allem eine Verringerung des Konsums tierischer Produkte bei Vergrößerung des Anteils regionaler und saisonaler Produkte und eine Bevorzugung von Produkten mit niedrigen spezifischen THG-Emissionen könnten hierbei einen Beitrag leisten.

SUMMARY

Climate change represents a substantial challenge for the management, use and protection of terrestrial and aquatic ecosystems as well as the sustainable use of the key water resources. Numerous feedbacks exist between agriculture, forestry, and water management sectors as well as the conservation of ecosystems and biodiversity. Almost all options to reduce greenhouse gas (GHG) emissions or to adapt to climate change in these sectors also have other socioeconomic or ecological consequences than the intended ones. Such feedbacks can

also affect the GHG reduction potentials of climate-change mitigation measures. One example are the GHG emission reductions associated with a substitution of bioenergy for fossil fuels, which are substantially influenced by direct and indirect systemic feedbacks in land use, such as changes in forest area that may result from changes in cultivated areas.

A multitude of options exist in the agricultural sector to reduce GHG emissions, in particular in ruminant feeding, manure management, reduction of nitrogen losses and increased nitrogen efficiency. Increased production of agricultural bioenergy can help to reduce GHG emissions, especially when implemented following an integrated optimization of food and energy production as well as a cascadic use of biomass. Short-term adaptation options include: changes in soil management such as mulching or reduced tillage; selection of heat- or drought tolerant breeds or cultivars; or changes in the timing of sowing or soil management measures; as well as improved crop rotation schemes. Medium-term options include: improved irrigation infrastructures and technologies; breeding of drought or heat resistant cultivars; development of monitoring systems for pests or infectious diseases; increased storage capacities; and other risk minimization strategies.

Due to the high carbon stocks in forests, the forestry sector is a key factor for land-use related GHG mitigation strategies. Forestry can contribute to climate-change mitigation through carbon sequestration as well as through the provision of low-carbon resources (e. g., materials, energy). Systemic interdependencies between the forest's production and sequestration functions, as well as its delivery of other ecosystem services, need to be considered. Socioeconomic as well as ecological and climate effects can be improved through an integrated optimization of forest production and biomass use cascades. For forestry, adaption to climate change is a particular challenge due to the long life span of trees and the long-term legacies of forest management measures. Changes in mean values of precipitation and temperature, including their effects on forest pathogens, as well as extreme events such as drought or storm events, need to be considered.

Few options exist to reduce GHG emissions in water management. Adaption to climate change can help addressing a multitude of challenges in that sector, which is most efficient if based on integrated, interdisciplinary concepts. These include: land-use changes in watersheds; protection against low and high water runoff in rivers; rubble and sediment management; as well as measures for drinking water supply and waste water treatment.

Climate change increases the pressures on ecosystems and biodiversity which are already affected by a multitude of factors such as land-use change or toxic chemicals. Removal of migration barriers, e. g., through the creation of a habitat network, is an important adaptation option. Many nature conservation measures can also help to increase carbon sequestration, e. g., through the protection or restoration of bogs and wetlands or a reduction of land-use intensity in suitable forest or wetland areas.

Demand-side options, e. g., changes in food consumption or reductions of food wastes, can help to reduce GHG emissions substantially. In particular, a reduction of the share of animal products in diets as well as an increased share of regional and seasonal products as well as preferred use of low-GHG products can contribute to demand-side related GHG mitigation.

KERNAUSSAGEN

- Es gibt zahlreiche Wechselwirkungen zwischen Land- und Forstwirtschaft, Wasser und Biodiversität.

Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel sowie Treibhausgas (THG)-Reduktionsmaßnahmen in einem Bereich haben in der Regel zahlreiche weitere Wirkungen zur Folge (hohe Übereinstimmung, mittlere Beweislage). Ökosysteme liefern zudem unverzichtbare Ökosystemleistungen, deren Aufrechterhaltung für die Gesellschaft von großer Bedeutung ist; THG-Minderung und Anpassung können diese Ökosystemleistungen positiv oder negativ beeinflussen (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage). Der Erfolg von Anpassungs- und THG-Minderungsstrategien hängt stark davon ab, diese Wechselwirkungen abschätzen und synergistisch nutzen zu können (hohe Übereinstimmung, mittlere Beweislage). Systemische Effekte sind auch verantwortlich für die großen Unsicherheiten bei der umfassenden Bewertung der THG-Effekte von Bioenergie; dies betrifft insbesondere direkte und indirekte Effekte von Landnutzungsänderungen (mittlere Übereinstimmung, mittlere Beweislage).

- In der Landwirtschaft bestehen vielfältige Möglichkeiten zur Verringerung der THG-Emissionen.

Bei konstanter Produktionsmenge liegen die größten Potenziale in den Bereichen Wiederkäuerfütterung, Wirtschaftsdüngerbehandlung, Reduktion der Stickstoffverluste und Erhöhung der Stickstoffeffizienz (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage). Beim Ausbau der Bioenergieproduktion auf landwirtschaftlichen Flächen können die Potenziale zur THG-Reduktion vergrößert werden, indem Fruchtfolgen, Tierhaltung und Biomassenutzungsflüsse im Hinblick auf Nahrungs-, Faser- und Energieproduktion integriert optimiert werden (mittlere Übereinstimmung, mittlere Beweislage, erheblicher

Forschungsbedarf). Erfolgreiche und nachhaltige THG-Minderungsstrategien in der Landwirtschaft können durch eine umfassende Förderung von ressourcenschonenden, ressourceneffizienten Bewirtschaftungskonzepten unter Berücksichtigung von ökologischem Landbau, Präzisionslandwirtschaft („precision farming") und Pflanzenzucht unter Erhaltung genetischer Vielfalt erreicht werden. Dafür sind standortangepasste Konzepte am besten geeignet (mittlere Übereinstimmung, starke Beweislage, erheblicher Forschungsbedarf).

- In der Landwirtschaft gibt es eine Vielzahl an sinnvollen Anpassungsmaßnahmen.

Diese Maßnahmen können nach kurzfristig (innerhalb weniger Jahre) und mittelfristig (mehrere Jahre bis Jahrzehnte) umsetzbaren Maßnahmen unterschieden werden. Kurzfristig können unter anderem eingesetzt werden: bodenwasserkonservierende Bodenbearbeitungsverfahren (Mulchen, reduzierte Bodenbearbeitung, etc.), Auswahl trocken- oder hitzeresistenter Arten bzw. Sorten (sofern bereits vorhanden), Anpassungen von Anbau- und Bearbeitungszeitpunkten und Fruchtfolge, Frostschutz, Hagelschutz, Risikoabsicherung, etc. (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage). Mittelfristig können u. a. folgende Maßnahmen umgesetzt werden: Verbesserung von Bewässerungsinfrastruktur und -technik, Monitoringsysteme für Schädlinge und Krankheiten, Risikoverteilung durch Diversifizierung, Züchtung trocken- oder hitzeresistenter Arten bzw. Sorten, Steigerung der Lagerkapazitäten, Umstieg der Bewirtschaftungsformen und andere Risikominimierungsstrategien (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage).

- Die Forstwirtschaft ist ein Schlüsselsektor für den Kohlenstoffkreislauf.

Der österreichische Wald stellte bis etwa 2003 eine bedeutende Senke für CO_2 dar; seither ist seine Senkenfunktion geringer und in manchen Jahren nahe Null. Für die Senkenfunktion des Waldes ist sowohl das Wachstum der Waldfläche als auch die Steigerung der pro Flächeneinheit gespeicherten Kohlenstoffmenge verantwortlich (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage). Durch forstwirtschaftliche Maßnahmen besonders auf feuchten, sauren und stickstoffreichen Standorten kann die THG-Bilanz der Waldböden verbessert werden (hohe Übereinstimmung, mittlere Beweislage). Der Ersatz von emissionsintensiven Rohstoffen bzw. Bauteilen in langlebigen Produkten, insbesondere Gebäuden, durch Holz kann zu einer Steigerung der Kohlenstoff-Speicherung in Produkten und insgesamt zu einer THG-Reduktion beitragen (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage). Die THG-Emissionsbilanz von forstlicher Biomasse hängt stark von systemischen Effekten im Forstsystem ab. Bei optimaler Einbindung in ein kaskadisches Nutzungskonzept, das in Österreich bereits verfolgt wird, kann sie Beiträge zu THG-Minderung leisten. Zu beachten sind Wechselwirkungen zwischen der eingeschlagenen Holzmenge, der Kohlenstoffsenke des Waldes sowie dem aufgebauten Kohlenstoffvorrat, die je nach Betrachtungszeitraum unterschiedliche Netto-THG-Emissionen ergeben (mittlere Übereinstimmung, mittlere Beweislage, erheblicher Forschungsbedarf).

- Die Forstwirtschaft muss langfristig planen – die Anpassung an den Klimawandel stellt für sie daher eine besondere Herausforderung dar.

Trotz erheblicher Unsicherheiten müssen bereits heute Entscheidungen gefällt werden, die sich unter geänderten Klimabedingungen bewähren sollen. Als geeignete Strategie in dieser Situation gilt eine Form der Waldbewirtschaftung, die den Forstwirten auch bei unerwarteten Entwicklungen ausreichend Handlungsspielraum verschafft (hohe Übereinstimmung, schwache Beweislage). Als besondere Herausforderungen gelten dabei die großen Unsicherheiten bei der Regionalisierung von Veränderungen in der Temperatur und besonders im Niederschlag und die Häufigkeit und Schwere von Extremereignissen, wie Sturmschäden und Starkregen, sowie die dadurch ausgelösten Probleme, wie Windwürfe oder Erosion (hohe Übereinstimmung, schwache Beweislage). Waldbrandgefahr und Aufwand für die Waldpflege werden vermutlich zunehmen (hohe Übereinstimmung, mittlere Beweislage). Das Risiko von Schadinsekten und forstschädlichen Pilzen wird steigen, u. a. durch Einwanderung von Schadorganismen aus südlichen Regionen und durch Handel sowie durch Erweiterung der Regionen mit Klimabedingungen, die Schädlinge begünstigen (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage). Die Wahl der geplanten Umtriebszeit ist ein wichtiger Parameter für Anpassungsstrategien insbesondere zur Verringerung des Risikos von Schadereignissen, wobei Wechselwirkungen mit der Kohlenstoff-Senkenfunktion des Waldes zu beachten sind (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage). Die Forstwirtschaft könnte aber auch vom Klimawandel profitieren: An vielen Standorten wird die Produktivität der Wälder durch den Klimawandel verbessert (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage).

- In der Wasserwirtschaft gibt es kaum Möglichkeiten zur THG-Minderung.

Im Bereich der Siedlungswasserwirtschaft kann die Errichtung von Faultürmen zur Erzeugung von Biogas bei Kläranlagen

von entsprechender Größe zur THG-Reduktion beitragen (hohe Übereinstimmung, mittlere Beweislage).[1]

- Erfolgreiche Anpassung der Wasserwirtschaft an den Klimawandel kann am besten durch einen integrativen, interdisziplinären Ansatz gewährleistet werden.

Anpassungsmaßnahmen in den Bereichen Hoch- und Niederwasser, wie etwa Landnutzungsänderungen im Einzugsgebiet, können durch Kohlenstoff-Sequestrierung zur THG-Minderung beitragen (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage). Veränderungen des Feststoffhaushalts durch die global ansteigende Lufttemperatur haben weniger nachteilige Auswirkungen auf Fließgewässersysteme als das fehlende Sedimentkontinuum (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage). In der Trinkwasserversorgung stellen insbesondere die Vernetzung kleinerer Versorgungseinheiten sowie die Schaffung von Redundanzen bei den Rohwasserquellen wichtige Anpassungsmaßnahmen dar (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage). In der Abwasserreinigung liegt die primäre Herausforderung in der Berücksichtigung verminderter Wasserführungen in den empfangenden Gewässern (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage). Eine Erhöhung des organischen Anteils im Boden führt zu einer Steigerung der Speicherkapazität von Bodenwasser (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage). Durch den Schutz und die Ausweitung von Retentionsflächen (z. B. Auen) können Ziele des Hochwasserschutzes und des Biodiversitätsschutzes zur Anpassung an geänderte Abflussverhältnisse kombiniert werden (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage).

- Der Klimawandel erhöht den Druck auf Ökosysteme und Biodiversität, die schon jetzt durch Landnutzung und andere Eingriffe belastet sind.

Steigender Druck auf Ökosysteme und Biodiversität kann zum Verlust der Fähigkeit von Ökosystemen führen, kritische Ökosystemleistungen weiterhin in ausreichender Quantität und Qualität zu liefern (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage). Risiken bestehen insbesondere durch bereits vorhandene Beeinträchtigungen sowie durch klimabedingte Verschiebungen von Arealgrenzen, denen Arten auf Grund von Wanderungsbarrieren, z. B. im alpinen Raum, nicht gewachsen sind. Die Schaffung eines umfassenden Lebensraumverbundes in Österreich stellt daher eine wichtige Anpassungsoption dar (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage).

[1] Wasserkraft wird in AAR 2014, Band 3, Kapitel 3 diskutiert.

- Der Schutz von Feuchtgebieten und die Verringerung der Nutzungsintensität in ausgewählten Gebieten kann Kohlenstoffsenken schaffen und Biodiversität fördern.

Feuchtgebiete und alte, wenig bis gar nicht genutzte Wälder speichern große Mengen Kohlenstoff und spielen eine Schlüsselrolle für die Erhaltung der Biodiversität (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage). Die Erhaltung bzw. Restaurierung von Feuchtgebieten und Verringerung bis hin zur Aufgabe der Nutzung ausgewählter Flächen (Feuchtgebiete, Wälder) bieten daher aus Sicht von Klima- und Naturschutz hohe Synergiepotenziale (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage). Derartige Maßnahmen können auch makroökonomisch attraktiv sein, brauchen aber entsprechende Anreizsysteme (mittlere Übereinstimmung, mittlere Beweislage).

- Nachfrageseitigen Maßnahmen, wie Veränderungen in der Ernährungsweise und Verringerung von Lebensmittelverlusten, kommt eine Schlüsselrolle zu.

Eine Umstellung der Ernährung in Richtung eines deutlich verringerten Konsums tierischer Produkte kann maßgeblich zur THG-Reduktion beitragen (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage). Ein regional und saisonal orientierter, überwiegend auf pflanzlichen Produkten beruhender Ernährungsstil sowie eine Bevorzugung von Produkten mit niedrigen THG-Emissionen in der Vorleistungskette kann erhebliche THG-Einsparungen bringen (hohe Übereinstimmung, mittlere Beweislage). Ein Umstieg auf Produkte aus biologischer Landwirtschaft kann zur THG-Reduktion beitragen, wenn er mit einer Nachfrageveränderung in Richtung pflanzlicher Produkte verbunden ist, die den Flächenmehrbedarf durch die geringeren Erträge kompensiert (mittlere Übereinstimmung, mittlere Beweislage). Die Verringerung von Verlusten im gesamten Lebenszyklus (Produktion und Konsum) von Lebensmitteln leistet einen wichtigen Beitrag zur THG-Reduktion. Allerdings sind die österreichischen Daten zu den Lebensmittelverlusten widersprüchlich und wenig robust (hohe Übereinstimmung, mittlere Beweislage).

2.1 Einleitung
2.1 Introduction

Der Klimawandel stellt für Management, Nutzung und Schutz von terrestrischen und aquatischen Ökosystemen sowie für die nachhaltige Bewirtschaftung der Schlüsselressource Wasser eine besondere Herausforderung dar. Diese stellt sich je nach betroffenem System – die Bandbreite reicht von weitgehend natürlichen Ökosystemen und Schutzgebieten bis hin

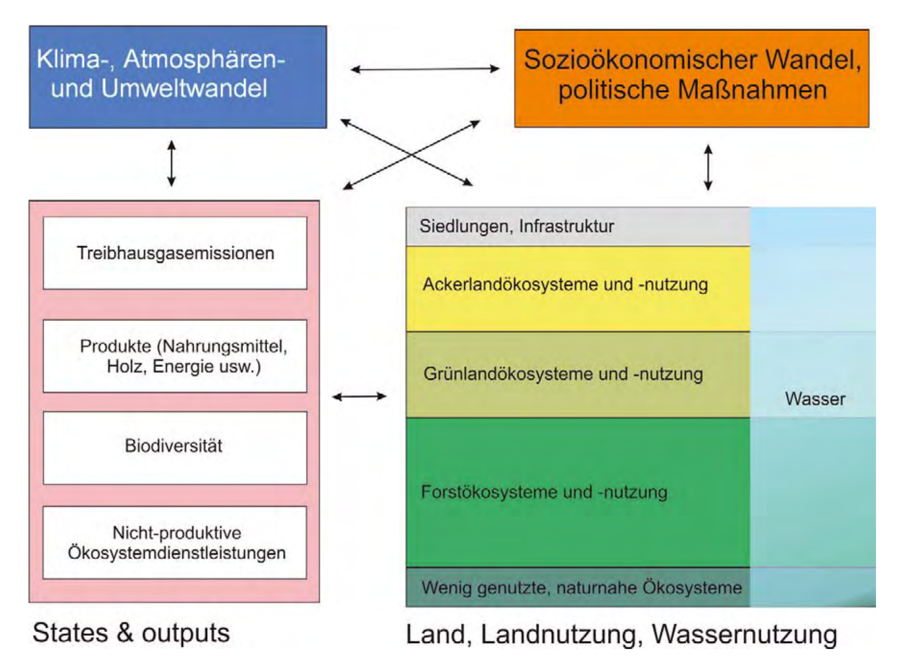


Abbildung 2.1 Das Landsystem ist durch intensive systemische Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Bereichen, wie Wirtschaft, Gesellschaft, Klima und Klimawandel, Ökosystemen, etc., gekennzeichnet. Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel oder zur Reduktion von THG-Emissionen haben daher in der Regel zahlreiche weitere Wirkungen zur Folge. Quelle: eigene Darstellung auf Basis von GLP (2005); MEA (2005); Turner et al. (2007)

Figure 2.1 Land systems are characterized by intensive systemic feedbacks between different components such as society, the economy, climate (change), ecosystems, etc. Activities to reduce GHG emissions or to adapt to climate change often cause numerous additional effects. Source: own graph based on GLP (2005); MEA (2005); Turner et al. (2007)

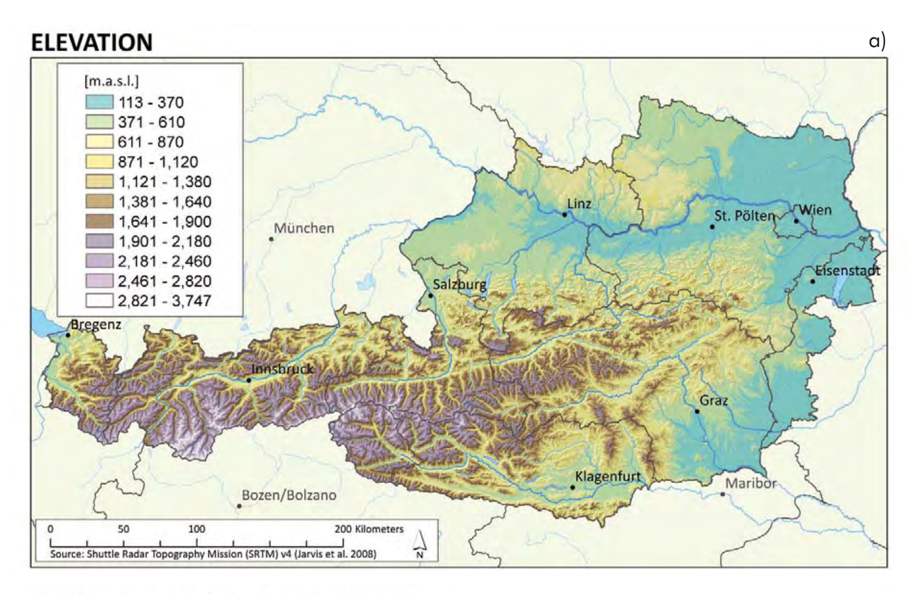
zu intensiv genutzten Agrarökosystemen – unterschiedlich dar. Ziel dieses Kapitels ist es, für Österreich den aktuellen Wissensstand zu Anpassung und THG-Minderung[2] sowie deren mannigfaltige Wechselwirkungen zu bewerten, zusammenzufassen und nutzergerecht aufzubereiten.

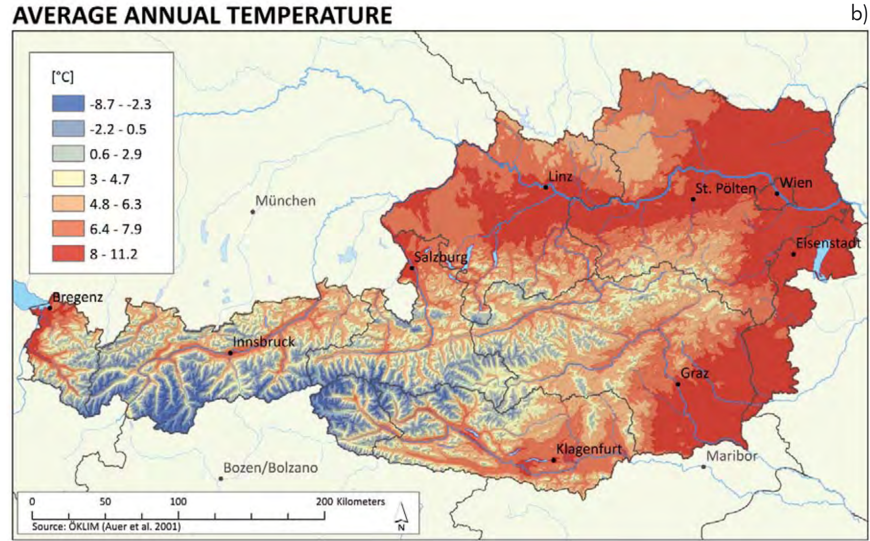
Das vorliegende Kapitel diskutiert den aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstand im Hinblick auf Optionen zur Verlangsamung des Klimawandels („mitigation of climate change“) sowie zur Anpassung an den Klimawandel („adaptation to climate change“) bezogen auf österreichische Landsysteme in einem sehr umfassenden Sinn, d. h. inklusive ihrer sozioökonomischen und biophysischen Komponenten (GLP, 2005; Turner et al., 2007). Das Kapitel bewertet den Stand der wissenschaftlichen Forschung zu diesen Themen sowie Handlungsoptionen aus Sicht der Wissenschaft, beruht aber nicht auf einem politischen Aushandlungsprozess. Politische Strategiepapiere, wie etwa die österreichische Anpassungsstrategie samt Hintergrunddokumenten (Haas et al., 2010) stellten eine wichtige Grundlage dar.

Das Landsystem zeichnet sich vor allem durch die sehr engen Verflechtungen zwischen sozialen, wirtschaftlichen, geomorphologischen, klimatischen und ökologischen Faktoren aus. Diese führen dazu, dass Veränderungen in einem Bereich, etwa in Wirtschaft und Gesellschaft, Auswirkungen in vielen anderen Bereichen haben (Abbildung 2.1). So kann beispielsweise eine Maßnahme zur Veränderung von Treibhausgasemissionen – z. B. die Ausweitung von Waldflächen und die Erhöhung der Bestockungsdichte zur Bindung von Kohlenstoff (C) – positive oder negative Rückwirkungen auf die Produktionsleistung (etwa die land- und forstwirtschaftliche Produktion) sowie auf andere Ökosystemleistungen (etwa die Rückhaltekapazität für Wasser oder den Schutz vor Lawinen oder Murenabgängen; vgl. MEA, 2005), auf die Biodiversität, das Risiko von Schadereignissen (Windwurf, Borkenkäferbefall) im Wald sowie auf den Klimaschutz selbst (z. B. indirekte Landnutzungseffekte) haben. Die Berücksichtigung derartiger Wechselwirkungen („feedbacks“) stellt eine große wissenschaftliche Herausforderung dar, ist aber für die Entwicklung robuster Strategien zum Umgang mit dem Klimawandel von großer Bedeutung.

Wie diese Prozesse in Österreich ablaufen, wie sie sich im Raum verteilen und wie die Wechselwirkungen ausgeprägt sind, hängt wesentlich von der geographischen Lage Österreichs als Alpenland ab, die eine erhebliche räumliche Heterogenität in vielfacher Hinsicht bedingt (Abbildung 2.2). Österreich weist beträchtliche Gradienten in Bezug auf Seehöhe, Klima (Niederschlag, Temperatur, Abfluss, etc.), Landnutzung und Landbedeckung sowie Bevölkerungsdichte bzw. Siedlungsstrukturen auf (die Verteilung der versiegelten Flächen in Abbildung 2.2(e) kann näherungsweise als Muster der Bevölkerungsdichte interpretiert werden). Siedlungsräume und intensive landwirtschaftliche Nutzung konzentrieren sich in den Tieflagen sowie den Gunstlagen des Berggebietes (z. B. in-

[2] Der Begriff „THG-Minderung“ umfasst sowohl eine Verringerung von klimawirksamen Emissionen (CO_2, CH_4, N_2O und andere Treibhausgase) als auch die Absorption von THG, insbesondere CO_2, aus der Atmosphäre, etwa durch Kohlenstoffsenken in Böden und Vegetation.





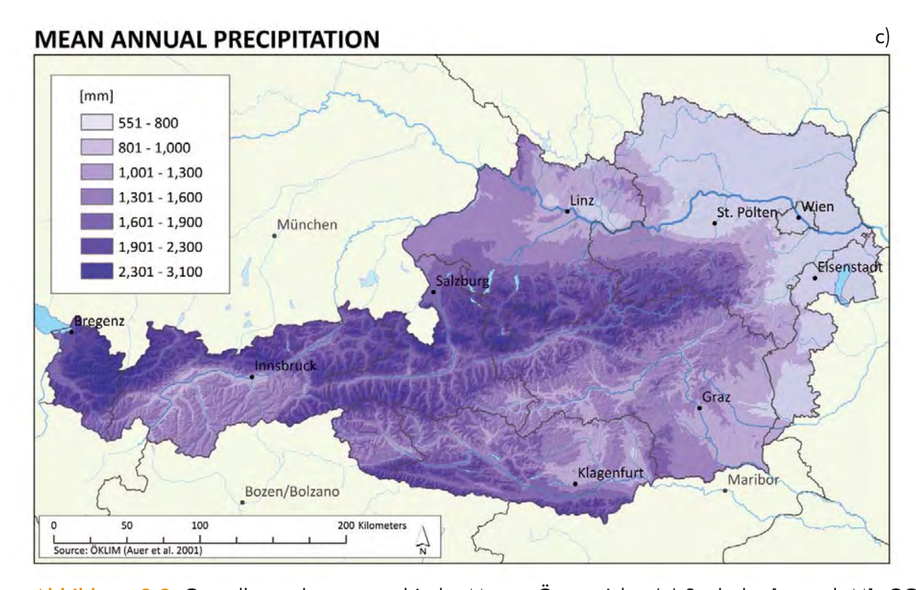


Abbildung 2.2 Grundlegende geographische Muster Österreichs: (a) Seehöhe [m ü. d. M], CGIAR-CSI, 2008; (b) Jährliche Durchschnittstemperatur [°C], Auer et al. (2001); (c) Mittlerer jährlicher Niederschlag [mm/Jahr], Auer et al. (2001); (d) Mittlerer jährlicher Abfluss [mm/Jahr], Lebensministerium (2012); (e) Landbedeckung nach Corine Land Cover, EEA (2007); (f) Bodenversiegelung [%], European Environment Agency (2013); (GIS Bearbeitung: a–c, e, f: C. Plutzar, d: B. Blamauer, H.Habersack)

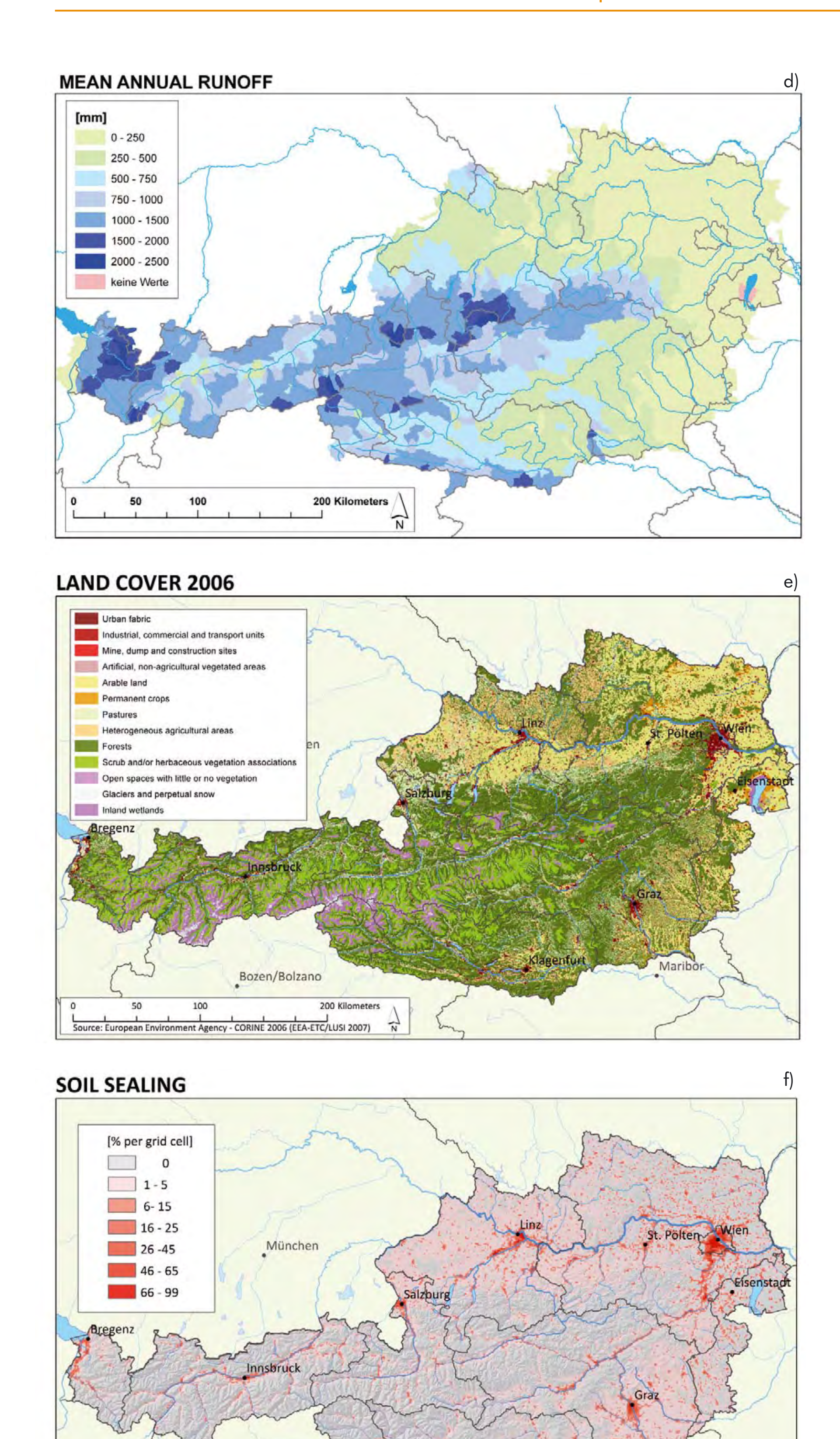


Figure 2.2 Fundamental geographic patterns in Austria. (a) Elevation [metres above sea level], CGIAR-CSI, 2008; (b) average yearly temperature [°C], Auer et al. (2001); (c) average yearly precipitation [mm/yr], Auer et al. (2001); (d) average yearly runoff [mm/yr], Lebensministerium (2012); (e) land cover according to Corine Land Cover, EEA (2007); (f) soil sealing [%], European Environment Agency (2013) (GIS map layout: a–c, e, f: C. Plutzar; d: B. Blamauer, H. Habersack)

neralpine Tallagen), wohingegen Forstwirtschaft und extensive alpine Grünlandwirtschaft im Bergland vorherrschen.

Österreichs Landesfläche wird etwa zu einem Drittel agrarisch genutzt, davon jeweils etwa die Hälfte als Grünland und Ackerland. Etwas weniger als die Hälfte der gesamten Landesfläche ist von Wäldern bedeckt. Der Klimawandel mit seinen Auswirkungen und möglichen Anpassungsmaßnahmen wird signifikante ökologische und sozio-ökonomische Konsequenzen für Österreich haben. Die vielfältigen Produktionssysteme innerhalb der Landwirtschaft in Kombination mit den räumlich stark variierenden Rahmenbedingungen (Klima, Boden, Agrarstruktur, etc.) ergeben zudem ein komplexes Bild möglicher Auswirkungen und Maßnahmen zu THG-Minderung und Anpassung.

Österreich ist trotz seiner relativ geringen Größe ein artenreiches Land mit einer Vielzahl von Lebensräumen und Landschaften. Dafür ist seine große naturräumliche und klimatische Vielfalt maßgeblich, die durch den Gebirgszug der Alpen, die Flach- und Hügelländer im Osten und Südosten sowie das kristalline Rumpfgebirge der Böhmischen Masse im Norden geprägt wird (vgl. Abbildung 2.2 (a–c)). Maßgeblich ist zudem Österreichs Lage im Schnittbereich zwischen mitteleuropäischen, süd- und südosteuropäischen biogeographischen Einflüssen sowie die langdauernde Überformung der Landschaft durch eine extensive Nutzung, die zu reich differenzierten Kulturlandschaften geführt hat. Im letzten Jahrhundert, besonders seit dem Ende des zweiten Weltkriegs, wurden die Landschaften und Lebensräume Österreichs zunehmend überformt, wobei dieser Prozess durch Nutzungsintensivierung, Kommassierung, Betriebsvereinfachung, Aufforstung von Grenzertragsböden, Verlust artenreicher Lebensräume, Fragmentierung als Folge des Ausbaus von Verkehrsinfrastruktur und zunehmende Verbauung geprägt ist.

Auf Grund der hohen Heterogenität Österreichs erscheint es sinnvoll, allgemein empfohlene Maßnahmen zur THG-Reduktion und Anpassung daher für jeden Produktionsstandort auf ihre Effizienz und Sinnhaftigkeit zu überprüfen. Das vorliegende Kapitel ist auf eine Analyse naturwissenschaftlich-technischer Zusammenhänge, wesentlicher sozioökonomischer Faktoren sowie daraus folgender Handlungsoptionen fokussiert. Die Diskussion der politischen Dimension muss angesichts der erheblichen Herausforderung unterbleiben, die mit einer Integration von vier deutlich unterschiedlichen Sektoren in einem Kapitel einhergeht, dessen Rahmensetzung sowohl durch seine maximale Länge als auch die leistbare Bearbeitungskapazität beschränkt ist. Diese einzubeziehen, wäre bei zukünftigen Berichten (bei geeigneten Rahmenbedingungen) sinnvoll.

2.2 Landwirtschaft
2.2 Agriculture

Auf Grundlage der natürlichen und landwirtschaftlichen Gegebenheiten wird Österreich in acht landwirtschaftliche Hauptproduktionsgebiete gegliedert, die wiederum in insgesamt 87 Kleinproduktionsgebiete unterteilt sind. In dieser Gliederung kommen die regionalen landwirtschaftlichen Produktionsbedingungen zum Ausdruck. So sind z. B. das nordöstliche Flach- und Hügelland, das Alpenvorland, das südöstliche Flach- und Hügelland und das Kärntner Becken von Ackerbaugebieten dominiert, während in den übrigen, kühleren und niederschlagsreicheren Regionen Grünland und Forstwirtschaft vorherrschen (Statistik Austria, 2012).

Laut Grünem Bericht (BMLFUW, 2013) gab es im Jahr 2010 insgesamt 173 317 landwirtschaftliche Betriebe. Bedingt durch den Strukturwandel geht die Anzahl der Betriebe zurück. Etwa 22 000 (13 %) davon sind Biobetriebe, welche rund 19 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche bewirtschaften. 58 % der Betriebe bewirtschaften weniger als 20 Hektar (ha) landwirtschaftliche Nutzfläche, 5 % mehr als 100 ha. Rund drei Viertel der Betriebe (129 117) liegen in benachteiligten Gebieten, davon wiederum 75 % in Berggebieten. Die Bergbauernbetriebe befinden sich überwiegend in den Hauptproduktionsgebieten Hochalpen, Voralpen, Alpenostrand sowie Wald- und Mühlviertel. Die österreichische Landwirtschaft ist im Vergleich zu westeuropäischen Staaten klein strukturiert, wobei die landwirtschaftlich genutzte Fläche pro Betrieb im Durchschnitt 18,8 ha beträgt (EU Mittel: 13 ha). Österreich hat mit einem Anteil von 51 % an der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche innerhalb der EU den höchsten Anteil an Berggebieten. Die landwirtschaftliche Nutzfläche ist rückläufig und umfasste im Jahr 2010 2,88 Millionen ha (34 % der österreichischen Gesamtfläche). Von der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche entfallen 47 % auf Ackerland, 50 % auf Dauergrünland (davon 31 % Almen) und 3 % auf sonstige Flächen (u. a. Obst- und Weinbau). Der Rinderbestand lag 2011 knapp unter zwei Millionen und der Schweinebestand bei etwa drei Millionen Tieren.

Im Jahr 2011 entfielen 3,2 Milliarden Euro (45 %) des Produktionswertes auf die pflanzliche Erzeugung, der Anteil der tierischen Produktion war fast gleich. Der Rest von 10 % waren landwirtschaftliche Dienstleistungen und Nebentätigkeiten. Der Anteil der Land- und Forstwirtschaft sowie der Fischerei an der Bruttowertschöpfung der Volkswirtschaft betrug 2011 rund 1,6 % (BMLFUW, 2012).

2.2.1 THG-Minderung in der Landwirtschaft

Landwirtschaftliche Treibhausgasemissionen, Trends und Szenarien

Die Klimawirksamkeit verschiedener THG ist unterschiedlich (vgl. Band 1). Jene von Methan (CH_4) ist über 100 Jahre gerechnet 25-mal größer als jene von CO_2, jene von Lachgas (N_2O) 298-mal. Seit den späten 1980er Jahren nahm die Konzentration von CH_4 und N_2O in der Atmosphäre um 158 % bzw. 19 % zu (WMO, 2010). Im Jahr 2010 stammten 75 % (12 Gg / Jahr; 1 Gg = 10^9 g = 1 000 t) der gesamten bilanzierten österreichischen N_2O-Emissionen und 65 % (171 Gg / Jahr) der CH_4-Emissionen aus dem Sektor Landwirtschaft. Innerhalb des Sektors Landwirtschaft hatte Lachgas einen Anteil von 52 % und Methan einen Anteil von 48 % an den gesamten bilanzierten Treibhausgas(THG)-Emissionen. Zwischen 1990 und 2010 sanken die landwirtschaftlichen CH_4-Emissionen um 14,2 % und die N_2O-Emissionen um 11,7 %. Etwa 44 % der landwirtschaftlichen THG-Emissionen stammen aus der Wiederkäuerverdauung, 39 % von landwirtschaftlichen Böden und 17 % aus dem Wirtschaftsdüngermanagement. Die klimarelevanten Emissionen aus dem Sektor Landwirtschaft sanken zwischen 1990 und 2010 um 12,9 % (Anderl et al., 2011a). Dies ist vor allem auf eine Abnahme der Tierzahlen und eine Reduktion des Stickstoffdünger-Einsatzes zurück zu führen. Seit 2005 sind die Tierzahlen weitgehend stabil. Zwischen 2008 und 2010 sanken die Emissionen wegen des geringeren Stickstoffdünger-Einsatzes. Gleichzeitig stiegen in diesem Zeitraum die Tierzahlen bei Schweinen und Rindern an, was zu einer Erhöhung der Emissionen aus der Wiederkäuerverdauung und den Wirtschaftsdüngern führte. Die Landwirtschaft war im Jahr 2010 mit 7,5 Mt CO_2-Äquivalente (abgekürzt: CO_2-Äq.) (1 Mt = 10^6 t = 1 Mio. t) für 8,8 % der bilanzierten österreichischen THG-Emissionen verantwortlich.

Zwischen 2010 und 2020 wird in einem Trendszenario eine leichte Abnahme der Tierbestände erwartet, danach dürften sie bis 2030 konstant bleiben (Anderl et al., 2011b). Der Verbrauch von Mineraldünger wird laut diesem Szenario leicht zurückgehen. Da der Trend in der Tierhaltung Richtung Flüssigmistsysteme geht, wird mit einer Zunahme der CH_4-Emissionen aus Wirtschaftsdüngern gerechnet. Es bestünde die Möglichkeit, diese Zunahme durch eine Ausweitung der Biogaserzeugung abzumildern. In Summe werden – ohne das Ergreifen zusätzlicher Maßnahmen – die THG-Emissionen aus dem Sektor Landwirtschaft bis zum Jahr 2030 etwa konstant bleiben (Anderl et al., 2011b). Innerhalb der Tierhaltung wird nach dem Wegfall der Milchquotenregelung im Jahr 2015 mit einem Anstieg der Anzahl an Milchkühen und der Milchproduktion gerechnet. Die Anzahl der Mutterkühe und der weiblichen Nachzuchtrinder wird etwa konstant bleiben. In diesem Szenario wird keine Ausweitung der Schweine- und Geflügelbestände erwartet. Auch die ökologisch bewirtschafteten Flächen sollen etwa gleich groß bleiben. Die Fläche an Acker- und Grünland insgesamt wird zurückgehen (Anderl et al., 2011c).

Eine möglichst genaue Abbildung der THG-Emissionen in Österreich ist Bedingung dafür, den Effekt von Minderungsmaßnahmen nachweisen zu können. Für ein belastbares Inventar ist eine exakte Datenerhebung Voraussetzung. Vorrangiges Ziel einer Optimierung der THG-Emissionsberichterstattung ist die richtlinienkonforme Inventarisierung nationaler Emissionsmengen gemäß den Anforderungen des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) nach Transparenz, Genauigkeit, Vollständigkeit und Konsistenz. Aufgrund der Vorleistungen des Umweltbundesamtes in Zusammenarbeit mit der Universität für Bodenkultur (BOKU) ist die Methodenoptimierung in Österreich weit fortgeschritten. Als Beispiele können die Umsetzung der Ergebnisse der TIHALO-Studie (Amon et al., 2007a) und die Revision der THG-Inventur mit nationalen Emissionsfaktoren im Jahr 2009 (Anderl et al., 2011a) genannt werden. Mit der Einführung der neuen Berechnungsvorschriften ab 2014 (Post-Kyoto) ist mit weiteren Revisionen zu rechnen, vor allem in folgenden Bereichen: österreichspezifische Emissionsfaktoren, genaue Aktivitätsdaten zu Tierhaltung, Wirtschaftsdüngermanagement und Pflanzenbau sowie eine Aktualisierung der TIHALO-Studie (Amon et al., 2007a) unter Berücksichtigung der neuesten Agrarstrukturerhebung.

THG-Minderungspotenziale in der Landwirtschaft: Einführung

Für die zukünftige Entwicklung der landwirtschaftlichen THG-Emissionen sind die Entwicklung der Tierbestände (vor allem der Rinderzahlen), die damit einhergehenden Wirtschaftsdüngermengen, sowie die Art und Weise der Bodenbewirtschaftung (hauptsächlich der Einsatz an organischen und mineralischen Stickstoffdüngern) kritische Einflussfaktoren. In der Landwirtschaft bieten sich eine Reihe möglicher Maßnahmen zur Minderung umwelt- und klimarelevanter Gase an. Im Rahmen verschiedener Projekte in Österreich wurden bzw. werden diese analysiert und beschrieben.

Ziel des Projektes Reclip:tom („Research for climate protection – technological options for mitigation“, Winiwarter et al., 2009) war es, Handlungsoptionen zur Reduktion von THG-

Emissionen für Österreich zusammenzustellen. Dabei sollten sowohl die Wirksamkeit der Maßnahmen als auch deren Kosten abgeschätzt und kritisch beleuchtet werden.

Im ACRP-Projekt „FarmClim“, welches bis Mai 2014 läuft, werden Flüsse von Stickstoff und anderen klimarelevanten Gasen in der österreichischen Landwirtschaft erfasst und Möglichkeiten zur Optimierung vorgeschlagen. Das Einbeziehen von Stakeholdern im Projekt soll dazu beitragen, den „Science-Policy-Gap“ im Bereich „Klimaschutz in der Landwirtschaft“ zu schließen. Projektpartner sind BOKU, Umweltbundesamt, Karl-Franzens-Universität Graz, AGES, LFZ Raumberg-Gumpenstein und die Landwirtschaftskammer Niederösterreich.

Das derzeit laufende ACRP-Projekt „CAFEE“ („Climate change in agriculture and forestry: an integrated assessment of mitigation and adaptation measures in Austria“) unter der Leitung des Instituts für nachhaltige Wirtschaftsentwicklung an der BOKU beschäftigt sich mit den Auswirkungen des Klimawandels auf die österreichische Land- und Forstwirtschaft, der Kosteneffektivität sowie den Wechselbeziehungen zwischen Minderungs- und Anpassungsmaßnahmen und den daraus ableitbaren politischen Handlungsempfehlungen.

Nachfolgend werden die wichtigsten Minderungsmaßnahmen für Treibhausgase aus dem Sektor Landwirtschaft erläutert.

THG-Reduktionspotenziale in der Tierhaltung

Mögliche Maßnahmen zur THG-Reduktion in der österreichischen Tierhaltung werden in Tabelle 2.1 beschrieben. Verdauungsbedingte CH_4-Emissionen von Milchkühen pro Liter Milch können durch einen moderaten Anstieg der Milchleistung pro Kuh reduziert werden. Allerdings besteht kein linearer Zusammenhang, vielmehr sinkt die THG-Einsparung mit zunehmender Steigerung der Milchleistung (Kirchgessner et al., 1993). Auf die spezifischen Ernährungserfordernisse der Kühe ist Rücksicht zu nehmen: die Aufnahme ausreichender Mengen Raufutter und die Begrenzung der Kraftfuttergabe. Auch muss die Maßnahme im gesamt-ökologischen Zusammenhang gesehen werden. Beispielsweise verwerten Milchkühe Pflanzen, die der menschlichen Ernährung nicht zugänglich sind. Dieser Vorzug der Milchwirtschaft bleibt nur erhalten, wenn die Steigerung der Milchleistung vorwiegend durch eine verbesserte Grundfutterqualität und erhöhte Grundfutteraufnahme erreicht wird und nur bedingt durch eine vermehrte Kraftfutteraufnahme. Grundfutter ist faserreiches Futter wie etwa Gras, Heu, Silage, etc. Zudem sinken die Emissionen je Liter Milch mit zunehmender Milchlebensleistung, da sich die Emissionen der unproduktiven Aufzuchtphase auf eine größere Outputleistung verteilen (UNECE, 1999).

Die CH_4-Emissionen aus Wirtschaftsdüngern können durch eine Behandlung des Wirtschaftsdüngers durch Biogaserzeugung oder Flüssigmistseparierung verringert werden. Biogaserzeugung wird hauptsächlich zur Energieproduktion eingesetzt, bewirkt aber gleichzeitig eine Verringerung der CH_4-Emissionen während der Lagerung des Wirtschaftsdüngers. Bei der Separierung wird organischer Kohlenstoff (C) mechanisch aus dem Flüssigmist getrennt. Der reduzierte Kohlenstoffgehalt führt zu einem geringeren Potenzial für Methanverluste. Während der Festmistlagerung lassen sich CH_4-Emissionen durch Kompostierung vermindern (Amon et al., 2006).

Im Bereich der Tierhaltung beeinflusst vor allem das Haltungssystem den Umfang der THG-Emissionen. CH_4-Emissionen sind bei Flüssigmistsystemen erheblich höher als bei Festmistsystemen, allerdings weisen Festmistsysteme höhere N_2O-Emissionen auf. In Summe sind THG-Emissionen aus Flüssigmistsystemen höher als aus Festmistsystemen (IPCC, 1997). Auch Konsumenten verlangen aus Gründen des Tierschutzes zunehmend nach Haltungssystemen, in denen Stroheinstreu verwendet wird. Diese Maßnahme kann aus Kostengründen nur für Stall-Neubauten umgesetzt werden. Dabei sollen Systeme verwendet werden, die den Festmist regelmäßig in ein Außenlager transportieren und keine Mistmatratze im Stall bilden.

CH_4-Emissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement sind bei Weidehaltung deutlich geringer als bei Stallhaltung (IPCC, 1997). Ein geringer Füllstand von Flüssigmistgruben während der warmen Sommermonate reduziert CH_4-Emissionen während der Lagerung (Amon et al., 2002). Die Genauigkeit von THG-Inventaren hängt u. a. davon ab, ob sie diese Unterschiede abbilden.

N_2O-Emissionen aus dem Wirtschaftsdüngungsmanagement sinken mit dem Gehalt an Stickstoff (N) im Wirtschaftsdünger; dieser hängt von der Fütterung der Tiere ab. Die aufgenommene Menge an Stickstoff sowie deren Umsetzung beeinflusst nicht nur die Höhe der Emissionen an Ammoniak (NH_3), sondern auch andere Stickstoff-Emissionen. Stickstoff-Überschüsse werden von den Nutztieren zum größten Teil in Form von Harnstoff mit dem Harn ausgeschieden. Die Stickstoff-Verbindungen werden rasch zu Ammonium (NH_4^+) abgebaut und beeinflussen so das Emissionspotenzial für NH_3. Eine Reduktion des Stickstoff-Inputs über die Fütterung führt zu einer Verringerung der Stickstoff-Ausscheidungen über den Harn, reduziert den Stickstoff-Fluss und führt dadurch zu einer Reduktion der NH_3- und N_2O-Emissionen (Jongebreur et

Tabelle 2.1 Überblick über mögliche Maßnahmen für die Verringerung der THG-Emissionen in der Tierhaltung in Österreich

Table 2.1 Overview of possible measures to reduce GHG emissions in livestock husbandry in Austria

Bereich	Instrumente zur Maßnahmenumsetzung, erwarteter Reduktionseffekt, Analyse und Bewertung
Nationales THG-Emissionsinventar	
Optimierung der Emissionsberichterstattung	Nur eine qualitativ hochwertige und aktuelle THG-Inventur erlaubt den verlässlichen Nachweis der Effekte von Minderungsmaßnahmen. Die Methoden im österreichischen THG-Emissionsinventar erscheinen als relativ verlässlich. Bestimmte Strukturdaten könnten unter Berücksichtigung der Agrarstrukturerhebung verbessert werden. Neue Richtlinien für den Post-Kyoto-Zeitraum erfordern die Modifizierung der verwendeten Modelle.
Tierhaltung	
Rind: Produktivität / Effizienz (Zucht, Fütterung, Herdenmanagement)	Die Optimierung der Zucht, Fütterung und des Herdenmanagements führt zu Verbesserungen der Produktivität und zu Effizienzsteigerungen. Die Steigerung der Produktionseffizienz kann durch die genomische Selektion erreicht werden. Die Förderung von Forschungsprojekten, die auf eine Erhöhung der Produktionseffizienz durch züchterische Maßnahmen abzielen, ist eine mögliche Maßnahme, um langfristig die THG-Emissionen zu verringern. Das zusätzliche THG-Einsparungspotenzial wird allerdings als gering eingestuft.
Rind: Erhöhung Lebensleistung in der Milchproduktion und Erhöhung der Nutzungsdauer	Die letzten Jahre zeigen einen Anstieg der Lebensleistung bei gleichbleibender bis leicht steigender Nutzungsdauer. Durch die Anwendung der genomischen Selektion wird bei den Kontrollkühen bis 2020 eine Steigerung in der Lebensleistung, unter Berücksichtigung der Nutzungsdauer, von 2 500 kg erwartet. Um ein solches Resultat zu erreichen, ist es notwendig, die derzeitigen Zucht- und Managementstrategien fortzuführen.
Rind: Leistungssteigerung bei der Milchproduktion	Die genetische Steigerung der Milchleistung führt, auf die Produktionseinheit bezogen, zu einer Verringerung der THG-Emissionen. Unter der Annahme einer konservativen Schätzung werden die CH_4-Emissionen im Rinder-Sektor bis zum Jahr 2020 um etwa 4 % gegenüber 2009 steigen (Hörtenhuber, 2012). Für diese Schätzung wurde eine durchschnittliche Milchleistungssteigerung auf der Datenbasis des Grünen Berichtes von 6 068 kg (2009) auf 7 200 kg Milch pro Kuh und Jahr und ein Anstieg des Milchkuhbestandes von derzeit 532 141 Stück (2011) auf 550 000 Stück (2020) unterstellt (Sinabell und Schönhart, 2012). Es ist daher davon auszugehen, dass das Potenzial zur Minderung der CH_4-Emissionen durch die steigende Milchproduktion überkompensiert wird.
Rind: Art der Stallhaltung	In Österreich ist eine Tendenz in Richtung Liegeboxen-Laufstall (Flüssigmistsystem) zu beobachten. Aus arbeitswirtschaftlichen sowie Kosten-Gründen ist nicht zu erwarten, dass Tiefstreusysteme – die aus Sicht der THG-Emissionen günstiger wären – eine größere Bedeutung erlangen werden. Positiv auf den Klimaschutz wirken sich Schrägbodenställe und andere eingestreute Systeme aus, bei denen sich im Stall keine Mistmatratze bildet. Bei Flüssigmistsystemen können die THG-Emissionen reduziert werden, indem der Flüssigmist regelmäßig in ein kühles Außenlager transportiert und nicht im warmen Stall gelagert wird.
Tierfütterung	
Rind: Erhöhung der Futterqualität	Die Erhöhung der Grundfutterqualität führt zu einer höheren Verdaulichkeit und dadurch zu einem geringeren Bruttoenergie-Bedarf, der sich im Inventar abbilden lässt. Die Erhöhung der Grundfutterqualität kann durch intensive Beratung (Personal) gesteigert werden.
Rind: Futterzusatzstoffe (Pflanzliche Extrakte, Tannine, Saponine, Probiotika, CH_4-Oxidation, Bakterien, Fettzugabe)	Forschungsergebnisse sind in vielen Bereichen vorhanden. Die Akzeptanz in der Praxis sowie die Wirtschaftlichkeit eines Einsatzes dieser Futterzusatzstoffe sind derzeit nicht gegeben. Im Bereich „Futterzusatzstoffe" ist ein Reduktionspotenzial von 5 – 10 % für enterogene CH_4-Emissionen realistisch (Smith et al., 2007). In diesem Bereich besteht Forschungsbedarf hinsichtlich der Kosten und des Nutzens. Vielfach sind (positive) Ergebnisse aus in vitro-Studien oder Kurzzeitversuchen vorhanden; Langzeitfütterungsversuche fehlen weitgehend (Flachowsky und Lebzien, 2009).
Rind: Höherer Weideanteil	Ein höherer Weideanteil bei gleichbleibender Futterintensität verringert die Emissionen von NH_3, CH_4 und N_2O. Durch Beratung und Förderung können die NH_3-Verluste um bis zu 5,2 % verringert werden (Amon et al., 2007a). Der Tierbesatz und die Weidedauer sind im Einzelfall zu prüfen. Durch das Bundestierschutzgesetz, das seit 2012 einen verpflichtenden Auslauf vorsieht, sind positive Effekte zu erwarten. Mit Förderung und Beratung erscheint es möglich, den Weideanteil etwa konstant zu halten oder leicht zu steigern. Eine deutliche Ausweitung der Weidehaltung ist aus topographischen und klimatischen Gründen nicht möglich.
Rind: Optimierung der Grundfutter-konservierung	Durch die Optimierung der Grundfutterkonservierung (Heu, Silage) kommt es zu einer Einsparung an Kraftfutter. Mit geeigneter Beratung können sowohl die Wirtschaftlichkeit der Betriebe verbessert als auch die THG-Emissionen reduziert werden.
Schwein: N-angepasste Fütterung	Durch die Phasenfütterung kann die Gesamt-N-Aufnahme beeinflusst werden, welche die Grundlage für Berechnung der NH_3- und N_2O-Emissionen darstellt. Der Effekt auf die NH_3- und N_2O-Emissionen wird als hoch eingeschätzt. Um eine verstärkte Umsetzung der Phasenfütterung in der Praxis zu erreichen, ist die landwirtschaftliche Beratung gefordert. Erhebungen von Strukturdaten zum Eiweißeinsatz in den österreichischen Betrieben sind ausständig.
Rind und Schwein: Abdeckung Güllelager	Mit technisch kostengünstigen Maßnahmen können Güllelager abgedeckt werden. Damit sind die NH_3-N-Verluste deutlich reduzierbar.
Vermeidung von Güllelagunen	Güllelagunen wirken sich negativ auf die THG-Situation aus. Keine Förderung von Güllelagunen.

al., 2005; Monteny, 2000). Stickstoff-Einträge, die bereits am Beginn der Verfahrenskette eingespart werden, belasten nachfolgend nicht die Umwelt. Die Vermeidung von Stickstoff-Überschüssen bei der Fütterung ist eine wichtige Option zur Verringerung von Stickstoff-Emissionen, inklusive N_2O. Auch vermehrte Weidehaltung verringert die N_2O-Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger. Im Vergleich zur Stallhaltung sind die N_2O- und NH_3-Emissionen auf der Weide geringer, da der Harn relativ schnell und verlustarm in den Boden versickern kann. Um die Verlängerung der Weidedauer den jeweiligen Gegebenheiten anzupassen, ist es sinnvoll, diesbezügliche Möglichkeiten im Einzelfall zu prüfen.

Im Bereich der Schweinehaltung passt die Phasenfütterung den Stickstoff-Gehalt im Futter an den variierenden Stickstoff-Bedarf im Lauf der Mast an. Eine Optimierung der Schweinefütterung führt zu einer hohen NH_3-Reduktion. Eine Herabsetzung des Rohproteingehalts (RP) von 170 g RP / kg Futter auf 140 g RP / kg Futter führte zu einer Reduktion der NH_3-Emissionen um 30 % (Canh et al., 1998a–e; Dourmad et al., 1993; Lenis und Schutte, 1990). Futtermittel mit reduziertem Rohproteingehalt senken die Stickstoff-Ausscheidungen und damit die potentiellen NH_3-Emissionen aus der Schweineproduktion effizient. Der physiologische Bedarf des Tieres setzt der Verfütterung von rohproteinarmem Futter jedoch Grenzen. Zudem ist der Einsatz von eiweißarmen Futtermitteln in Betrieben, die Nebenprodukte der Lebensmittelverarbeitung verfüttern, nur bedingt möglich. Eine zweistufige Phasenfütterung, die in der ersten und zweiten Masthälfte Rationen mit unterschiedlichem Stickstoff-Gehalt füttert, ist jedoch in der Regel möglich und kommt ohne den Einsatz künstlicher Aminosäuren aus.

Das Abdecken von offenen Güllebehältern, ist eine effiziente Maßnahme, um NH_3-Verluste bei der Lagerung zu reduzieren und die Stickstoff-Verluste zu begrenzen. Offene Lagunenlagerung ist in diesem Zusammenhang als besonders ungünstig zu bewerten. Besonders effizient ist das Abdecken bei Gülle-Arten, die keine natürliche Schwimmdecke bilden. Ein direkter Einfluss auf N_2O-Emissionen ist nicht gegeben. Indirekte N_2O-Emissionen sinken auf Grund der geringeren NH_3-Emissionen.

Eine europäische Vergleichsstudie (Leip et al., 2010) ergab, dass die THG-Emissionen in der österreichischen Tierhaltung geringer sind als in anderen Ländern. Die Emissionen pro kg Rindfleisch betragen im EU-Durchschnitt 22,2 kg CO_2-Äq, in Österreich sind es 14,2 kg CO_2-Äq. Bei Schaf- und Ziegenfleisch liegen die Werte in Österreich bei 9 kg CO_2-Äq gegenüber dem EU-Durchschnitt von 20,3 kg CO_2-Äq. Bei Schweinefleisch liegt Österreich bei 5,5 kg CO_2-Äq und damit unter dem EU-Durchschnitt von 7,5 kg CO_2-Äq. Bei Milch liegen die Werte für Österreich und Irland mit 1 kg CO_2-Äq pro kg Milch EU-weit am niedrigsten; der EU-Durchschnitt pro kg Milch beträgt 1,4 kg CO_2-Äq. Die Differenzen der Emissionswerte ergeben sich aus Unterschieden in Haltung und Fütterung bzw. verwendeten Futtermitteln.

THG-Reduktionspotenziale durch Bodenbearbeitung und Düngermanagement

Direkte N_2O-Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden können durch eine Verminderung des Mineraldüngereinsatzes reduziert werden (IPCC, 1997). Dies kann erreicht werden, indem die Stickstoffdüngung sowohl zeitlich als auch mengenmäßig dem Bedarf der Pflanzen angepasst wird. Die Produktion von Mineraldünger ist ein energieintensiver Prozess, der mit hohen CO_2-Emissionen verbunden ist. Durch Fördermaßnahmen des Lebensministeriums im Rahmen des ÖPUL-Programms, das eine Reduktion des Düngemitteleinsatzes forciert, konnten bereits Verbesserungen in diesem Bereich erzielt werden. Das größte Potenzial besteht in einer an den Nährstoffbedarf der Pflanzen angepassten Stickstoff-Düngung. Stickstoffgaben, die über den Bedarf der Pflanzen hinausgehen, sind zu vermeiden. Die Intensität der Produktion muss der Produktivität des jeweiligen Standortes angepasst werden.

Indirekte N_2O-Emissionen können nur vermindert werden, wenn der landwirtschaftliche Stickstoff-Überschuss reduziert und der Stickstoff-Kreislauf weitgehend geschlossen wird. Dies kann durch eine verbesserte Stickstoff-Ausnutzung und eine Minderung von Stickstoff-Verlusten erreicht werden. Grundsätzlich ist das Vermeiden von Stickstoff-Überschüssen die nachhaltigste und effizienteste Maßnahme, um sowohl N_2O- als auch NH_3-Emissionen zu reduzieren.

Maßnahmen bei der Ausbringung von Wirtschaftsdüngern:

- Organisatorische Maßnahmen: Werden Wirtschaftsdünger bei ungünstigen Witterungsbedingungen (trockenes, windiges und warmes Wetter) ausgebracht, ist mit hohen Stickstoff-Verlusten durch NH_3-Emissionen zu rechnen.
- Technische Maßnahmen: Heute stehen verschiedene emissionsarme Ausbringtechniken zur Verfügung. Die Systeme reduzieren die verschmutzte Oberfläche durch das bandförmige Ablegen der Gülle oder arbeiten die Wirtschaftsdünger direkt in den Boden ein.

Bei bodenschonender Bewirtschaftung werden die Tiefe und Intensität der Bearbeitung und die Anzahl der Feldüberfahrten wesentlich verringert. Messungen des Treibstoffverbrauchs bei

unterschiedlichen Bodenbearbeitungsverfahren zeigten, dass die verfahrensbedingten CO_2-Emissionen bei Mulchsaat um 60 % und bei Direktsaat um 91 % gesenkt werden konnten (Klik et al., 2010), wobei die Bearbeitungsintensität (z. B. Anzahl erforderlicher Arbeitsgänge) und Bearbeitungstiefe eine große Rolle spielen (Szalay et al., 2009). Nach Moitzi et al., (2006) steigt je nach Bodenart der Kraftstoffbedarf pro Zentimeter Arbeitstiefe beim Pflügen um 0,5 bis 1,5 l/ha an, da pro 1 cm Bearbeitungstiefe ca. 100 m^3 bzw. 150 t Boden/ha bewegt werden. Die Lockerbodenwirtschaft mit der jährlich wendenden Bodenbearbeitung weist den höchsten Kraftstoff- und Arbeitszeitbedarf auf. Bei Winterweizen kommt es bei den Mulchsaatvarianten gegenüber der Lockerbodenwirtschaft zu einer Verminderung des Kraftstoffverbrauchs zwischen 42 % und 55 %.

Direktsaat zeigt auch günstige Auswirkungen auf Bodenatmungsprozesse. Eine große Anzahl von Studien belegt, dass durch konservierende Bodenbearbeitung die CO_2-Emissionen deutlich reduziert werden können (Alvarez et al., 2001; Ball et al., 1999; Ellert und Janzen, 1999). Untersuchungen an drei Standorten in Niederösterreich ergaben, dass der Einfluss der Bearbeitung auf die Bodenatmung standortspezifisch ist und neben der Pflanzenart wesentlich von den Bodeneigenschaften abhängt. Durch Umstellung auf Direktsaat waren Reduktionen um bis zu 27 % möglich (Klik et al., 2010). Darüber hinaus zeigte sich, dass aerobe terrestrische Böden als Methansenken fungieren. Durch den zusätzlichen Anbau von Winterzwischenfrüchten ist mit konservierenden Bearbeitungsverfahren eine signifikante Kohlenstoffsequestrierung im Boden möglich (Baumgarten et al., 2011). Auch durch Ausbringung von Biokohle wurde Kohlenstoffsequestrierung in Böden nachgewiesen, zugleich mit anderen positiven Wechselwirkungen (Klinglmüller et al., 2011; Soja et al., 2011), wobei verhältnismäßig hohe Kosten von 90–420 Euro je eingesparter Tonne CO_2-Äquivalenten anfallen (Klinglmüller, 2013). Allerdings ist der Einsatz von Biokohle in der Landwirtschaft nur unter bestimmten Bedingungen sinnvoll. Die Ausbringung von Biokohle als Maßnahme zur THG-Minderung ist nicht generell empfehlenswert, da es vielfältige, nicht immer positive Auswirkungen gibt (Soja et al., 2013). Bei der Bewertung eines möglichen Beitrags von Biokohle zur THG-Reduktion ist die Systemgrenze entscheidend. So kann z. B. der zusätzlich nötige Einsatz von mineralischen Stickstoffdüngern zu einer deutlichen Verschlechterung der Klimabilanz führen, wenn die energieintensive Erzeugung des Düngers mitbetrachtet wird.

Bei der Biogaserzeugung aus Sommer-Zwischenfrüchten erreicht man neben einer Einsparung fossiler Energieträger auch eine deutliche Reduktion der Stickoxid (NO_x)-Emissionen aus dem Boden sowie eine Verringerung der Stickstoffauswaschung (Szerencsits et al., 2011). Zudem trägt die intensive Durchwurzelung der Böden zu einem deutlich reduzierten Kraftstoffverbrauch bei der Bodenbearbeitung mittels Pflug bei.

Ein Beitrag zur THG-Reduktion kann vor allem auch durch eine verbesserte Effizienz bei der Nutzung der eingesetzten Produktionsmittel erreicht werden. Eine bedarfsgerechte Bewässerung, d. h. eine Wassergabe zum optimalen Zeitpunkt und in optimaler Höhe, reduziert zum Beispiel das Risiko der Tiefenversickerung (Leaching) und des damit verbundenen Austrags von Nähr- und Schadstoffen. Ein weiteres Beispiel aus der Bewässerungslandwirtschaft ist der Einsatz von Kleinregnerflügeln bei denen der Energiebedarf aufgrund des geringeren Druckes deutlich niedriger ist als bei Verwendung von Großflächen-Beregnungsmaschinen. Tropfbewässerung erweist sich hierbei als noch energieeffizienter.

Auch ein optimiertes Düngungsregime fördert die Effizienz eingesetzter Dünger. Insbesondere bei mineralischem Stickstoffdünger im Ackerbau ist eine Abstimmung der Gaben auf Boden, Witterung, Pflanzenzustand und Entwicklung von enormer Bedeutung für die Stickstoff-Nutzungseffizienz, die NO_x-Emissionen und die Stickstoff-Auswaschung. Alternativen zur mineralischen Stickstoffdüngung sollten generell in Betracht gezogen werden. Eine zehnjährige Untersuchung an einem Standort im Marchfeld zeigte deutlich, dass Kompostdüngung für den Humusaufbau sehr gut geeignet ist (Hartl et al., 2012).

Optionen zur Bioenergieerzeugung auf landwirtschaftlich genutzten Flächen

Bezogen auf Österreich analysierten Amon et al. (2008) Möglichkeiten und Grenzen der Erzeugung von Bioenergie. Sie diskutierten dabei insbesondere die möglichen Folgen für Ökosysteme und Landschaften, die Vermeidung von zu einseitigen Fruchtfolgen („Monokulturen“) sowie die Möglichkeit, eine hohe Lebensmittel-, Stoff- und Energieproduktion auf bereits genutzten Flächen zu erzielen und negative Auswirkungen auf den Boden durch standortangepasste, vielfältige Bepflanzung zu reduzieren. Gemäß der Studie ermöglichen es integrierte Fruchtfolgesysteme, die Gewinnung von Nahrung, Futter, Rohstoffen und Energie zu optimieren. In ähnlicher Weise funktionieren agroforstwirtschaftliche Systeme, die begrenzte Landressourcen über die gleichzeitige Nutzung mehrerer Kulturen effizient ausnutzen, allerdings zu höheren arbeitswirtschaftlichen Kosten (vgl. Ergebnisse des europäischen SAFE-Projekts[3]).

[3] http://www1.montpellier.inra.fr/safe

Integrierte Fruchtfolgesysteme beruhen auf einer Kombination unterschiedlicher Techniken, unter anderem:

- Fruchtwechsel zwischen Kulturarten für Nahrung, Rohstoffe oder Energie („Food-Non-Food-Switch“);
- Kaskadennutzung, bei der die vegetativen und generativen Teile der Nutzpflanze in unterschiedlicher Form verwendet werden (Haberl und Geissler, 2000; Haberl et al., 2003), etwa Maiskörner für Stärke, Sonnenblumenkerne für Ölproduktion, der Rest der Pflanzen und des Presskuchens für Biogaserzeugung.

Integrierte Fruchtfolgesysteme ermöglichen eine weitgehende Kreislaufwirtschaft, bezogen auf die in der Biomasse enthaltenen Nährstoffe, sowie eine Rückführung von organischem Material als Dünger, was die Kohlenstoffbilanz der Landnutzung positiv beeinflusst (Ceschia et al., 2010). Wird Biomasse zur Wärme- oder Stromgewinnung verbrannt, gehen die entzogenen Nährstoffe teilweise verloren und müssen durch mineralische Düngemittel ersetzt werden. Bei der Herstellung von Mineraldünger werden große Mengen an Fossilenergie benötigt. In einem geschlossenen Nährstoffkreislauf werden die Nährstoffe, die dem Boden bei der Ernte entzogen wurden, wieder zurückgeführt. Ein solcher Kreislauf ist gegeben, wenn Biomasse für Biogasgewinnung vergoren und der Gärrückstand als hochwertiger Nährstoff- und Humusdünger wieder auf die Felder ausgebracht wird.

Auch der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln kann durch integrierte Fruchtfolgesysteme deutlich gesenkt werden. Durch eine ausgewogene Fruchtfolgegestaltung, im Sinne eines räumlichen und zeitlichen Anbaukonzepts, kann das Auftreten von Krankheiten und Schädlingen reduziert oder vermieden werden (Diercks und Heitefuss, 1990). Der Verzicht auf Herbizide im Energiepflanzenanbau fördert Ackerbeikräuter und in weiterer Folge das Vorkommen von Nützlingen, die wiederum Schadinsekten dezimieren können (Nentwig, 1992). Da im Energiepflanzenanbau auch die Biomasse von Beikräutern mitverwertet werden kann, ist eine etwas höhere Verunkrautung als im reinen Nutzpflanzenanbau tolerierbar.

Mit integrierten Systemen kann Bioenergie weitgehend ohne Nahrungsmittelkonkurrenz erzeugt werden. Gleichzeitig werden durch solche Systeme der Fossilenergieinput, der Einsatz von Mineraldünger und Pestiziden sowie insgesamt die ökologischen Belastungen reduziert. Als Bioraffinerie definiert die IEA Bioenergy Task 42[4] die nachhaltige Umwandlung von Biomasse in ein Spektrum verkäuflicher Produkte (Nahrungsmittel, Futtermittel, Materialien und Chemikalien) und Energie (Treibstoffe, Elektrizität, Wärme; vgl. Höltinger et al, 2012). Mit Bioraffinerie-Systemen können nicht nur die nachwachsenden Rohstoffe (z. B. Feldfrüchte) zur Energiegewinnung genutzt werden, sondern zum Teil auch der Grasbewuchs von Grünlandflächen und v. a. biogene Reststoffe: Mist und Jauche aus der Tierhaltung, biogener Abfall aus Haushalten sowie Reststoffe aus der Lebensmittelverarbeitung, wie z. B. Zuckerrübenschnitzel. Sämtliche nutzbaren Stoffströme können mithilfe vielfältiger, miteinander verbundener Technologien zur Energiekonversion und Stofferzeugung umgeleitet und schließlich wieder in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden (Amon et al., 2008).

Die Hektarerträge an Energie sind zwar bei der integrierten Nutzung geringer als beim spezifischen Anbau von Energiepflanzen, jedoch liefert das integrierte System Energie, Futter und Nahrung und ist auf diese Weise insgesamt wesentlich leistungsfähiger. Während etwa ein integriertes System einen Ertrag von 3500 m^3/ha/Jahr CH_4 bringt, kann Grünmais rund 6500 m^3/ha/Jahr liefern (Hopfner-Sixt et al., 2007). Im Gesamtsystem würde jedoch die Umstellung der Landwirtschaft auf integrierte Landnutzungssysteme mit vielfältigen Fruchtfolgesystemen und mit Grünland- und Gülleverwertung beträchtlich höhere Gesamterträge an Energie bringen als der Anbau von Energiepflanzen alleine (Amon et al., 2007b). Eine Umstellung des österreichischen Ackerlandes (rd. 1,3 Mio. ha) auf integrierte Nutzung könnte einen Energieertrag von etwa 190 PJ/Jahr (1 PJ = 10^{15} J) bringen, während ein Anbau von Energiepflanzen auf 20 % der österreichischen Ackerfläche nur rund 71 PJ/Jahr brächte (Bauer et al., 2007). Zudem könnten vom österreichischen Wirtschaftsgrünland (908 000 ha) etwa 20 % zur Energiegewinnung in Form von Biogas genutzt werden, was bei einem Methanertrag von etwa 3000 m^3/ha/Jahr einen Energieertrag von etwa 35 PJ/Jahr Energieertrag bedeutet. Dazu kämen noch etwa 7,3 PJ/Jahr durch Verwendung von Gülle aus der Tierhaltung. Insgesamt könnten durch eine Umstellung der österreichischen Landwirtschaft auf integrierten Anbau rund 220 PJ/Jahr an Energie bereitgestellt werden. Dies ist erheblich mehr als die 50 PJ/Jahr, welche der nationale Biomasseaktionsplan des BMLFUW (2006) für das Jahr 2020 vorsieht.

Bioenergietechnologien für agrarische Biomasse

Für einen nachhaltigen Ausbau der Bioenergienutzung sind nicht nur die Anbausysteme, sondern auch der Technologiemix von entscheidender Bedeutung. Die Biogaserzeugung

[4] Biorefineries: Co-production of Fuels, Chemicals, Power and Materials from Biomass, http://www.ieabioenergy.com

wird als Schlüsseltechnologie zur nachhaltigen Nutzung agrarischer Ressourcen angesehen (Amon, 2006). Biogas (früher oft als „Sumpfgas" bezeichnet) ist ein Gasgemisch aus 50–65 % Methan (CH_4), 35–50 % Kohlendioxid (CO_2) und geringen Anteilen von Wasserstoff (H_2), Schwefelwasserstoff (H_2S) und Ammoniak (NH_3). Biomasse von Äckern und Wiesen wird bereits erfolgreich für die Biogaserzeugung eingesetzt, wobei vor allem die Energiepflanzen Mais, Grünroggen, Sonnenblume, Wiesengras und Sorghumarten wie Sudangras verwendet werden. Eine Vielzahl weiterer Pflanzenarten und vor allem auch vergärbare organische Abfälle und tierische Exkremente, wie Biomüll, Gülle und Mist, können für die Gasgewinnung genutzt werden. Obgleich die Entwicklungen in der Biogasbranche rasch voranschreiten, ist es für deren wirtschaftlichen Durchbruch notwendig, Biogas noch effizienter zu erzeugen, als es derzeit geschieht. In dieser Technologie steckt noch umfangreiches Entwicklungspotenzial in allen Bereichen der Erzeugungskette, vom Rohstoff über die Anlagentechnik bis hin zu den verschiedenen Anwendungsbereichen. Wie effizient die Ressourcen bei der Biogasproduktion und -verwendung entlang der Wertschöpfungskette genutzt werden können – etwa auch beim Einsatz des Biogases durch gekoppelte Erzeugung von Strom und Wärme – wird daher sowohl für das Marktpotenzial als auch für die ökologische Sinnhaftigkeit der Technologie von großer Bedeutung sein (Leonhartsberger et al., 2008).

Die Biogaserzeugung stellt andere Anforderungen an die Qualität und Zusammensetzung der Pflanzen als die Nahrungs- oder Futtermittelproduktion. Derzeit wird in den österreichischen Biogasanlagen am häufigsten Mais verwendet. Biogasanlagen sind hauptsächlich in den Maisgunstlagen (Steiermark, Kärnten und Oberösterreich) verbreitet, weil die LandwirtInnen mit dieser Pflanze aus der Nahrungsmittelproduktion sowie der Rinder- und Schweinefütterung vertraut sind. Obwohl Mais aus technischer Sicht zur Biogasproduktion gut geeignet ist, könnten – wie oben ausgeführt – durch ein integriertes Konzept Nachteile des reinen Energiepflanzenanbaus, wie etwa Flächenkonkurrenz, hoher Düngemittel- und Pestizidbedarf, etc., vermieden und ein insgesamt wesentlich höheres Energiepotenzial erzielt werden. Aus technischer Sicht sind vor allem folgende Faktoren für die Eignung von Kulturarten für ihre Nutzung in Biogasanlagen entscheidend: Biomasseertrag, hohes Methanbildungspotenzial der Biomasse und die ausgewogene Zusammensetzung für einen sicheren Gärverlauf. Diese Faktoren sind für die Wirtschaftlichkeit der Anlagen wesentlich (Amon et al., 2008; Leonhartsberger et al., 2008; Hopfner-Sixt et al., 2006).

Die energetische Verwertung von Stroh, das nicht in Konkurrenz zum Bedarf der Tierhaltung steht, in Biogasanlagen stellt derzeit ein Problem dar, weil es durch seinen hohen Gehalt an Lignozellulose von Bakterien nur schwer abgebaut werden kann. Zudem neigt Stroh zur Bildung von Schwimmdecken im Fermenter, welche die Funktionssicherheit von Biogasanlagen beeinträchtigen. Daher wird intensiv und erfolgversprechend an Vorbehandlungsmethoden für derartige schwer abbaubare Substrate geforscht. Durch die Thermo-Druck-Hydrolyse kann Stroh verflüssigt werden, wodurch sowohl die Schwimmdeckenbildung beseitigt, als auch die Abbaubarkeit der Lignozellulose für die Mikroorganismen im Fermenter erhöht wird, was eine schnellere Umwandlung in Methan ermöglicht (Bauer et al., 2010). Alternativ ist die kaskadische Nutzung von Stroh, z. B. in der Wärmedämmung von Gebäuden und einer späteren Verbrennung, oder die in Pilotversuchen bereits umgesetzten Gebäude mit Stroh als tragendem Element anzudenken. Eine Übersicht zu den biologisch-technischen bis ökonomischen Potenzialen von Biomasse zur Energiegewinnung in Österreich findet sich in Koland et al. (2013). Dass viele der aufgezeigten Möglichkeiten noch nicht Einzug in die Praxis gefunden haben, liegt an deren Kosten, seien es direkte Nutzungskosten, etwa die Errichtung einer Biogasanlage oder einer Kurzumtriebsplantage, oder Opportunitätskosten durch den Gewinnentgang ökonomisch attraktiverer Alternativen. Letzteres Argument wird besonders in Phasen hoher Agrarpreise schlagend. Weitere Gründe könnten sein: fehlendes praxistaugliches Wissen oder dessen mangelnde Diffusion zu den LandnutzerInnen, Risikoaversion und unsichere Marktbedingungen sowie Kapitalbeschränkungen.

2.2.2 Anpassungsmaßnahmen in der Landwirtschaft

In Österreich sind vielfältige Auswirkungen des Klimawandels auf die verschiedenen Produktionsbereiche der Landwirtschaft zu erwarten (vgl. Band 1 und Band 2). Dementsprechend ergeben sich zahlreiche mögliche Anpassungsmaßnahmen, welche dann am effizientesten sind, wenn sie vor ihrer Umsetzung sorgfältig geprüft und auf die jeweiligen Gegebenheiten abgestimmt werden (Eitzinger, 2010a; Frank et al., 2011; Kirchner et al., 2012).

Grundsätzlich können im Sektor Landwirtschaft Anpassungsmaßnahmen auf Betriebsebene und auf überbetrieblicher Ebene (privater/öffentlicher Bereich) entschieden oder angeordnet werden, wobei die Umsetzung letztlich immer auch auf Betriebsebene erfolgen muss. Anpassungsmaßnahmen können mehr oder weniger zwangsläufig (autonom) erfolgen, etwa wenn der Klimawandel die Phänologie der Pflanzen beeinflusst, d. h. zeitliche Veränderungen im Jahresablauf bewirkt,

und auf diese Weise produktionstechnische Maßnahmen bedingt. Sie können aber auch eine bewusste Entscheidung (geplant) zwischen mehreren Optionen voraussetzen, z. B. Wechsel der Fruchtfolge, der Kulturart oder der Bodenbearbeitung.

Aus gesellschaftlicher Sicht erscheint es sinnvoll, „Nutzen“ und „Kosten“ von Anpassungsmaßnahmen nicht nur ökonomisch zu betrachten, sondern auch vor dem Hintergrund einer nachhaltigen Landbewirtschaftung und einer THG-Reduktion abzuwägen (vgl. Abschnitt 2.2.3). Dabei können Interessenskonflikte zwischen gesamtgesellschaftlichen Interessen und den Interessen von privaten LandnutzerInnen entstehen, die in der Regel durch Aushandlungsprozesse zu lösen sind. Eine umfassende Abschätzung der ökonomischen Relevanz möglicher Anpassungsoptionen war u. a. wegen der großen Unsicherheiten hinsichtlich zukünftiger sozioökonomischer Rahmenbedingungen nicht möglich.

Anpassungen im Ackerbau – einjährige Nutzpflanzen

Der Ackerbau mit dem Anbau ein- bis mehrjähriger Nutzpflanzen hat einen vorwiegend geringen Bedarf an langlebigen und nichtbeweglichen Investitionsgütern und stellt somit ein flexibles Produktionssystem dar, das kurzfristige Anpassungen in der Produktionstechnik erlaubt. Viele der empfohlenen Maßnahmen auf Betriebsebene zielen auf eine Erhaltung oder Verbesserung der Wasser- und Nährstoffnutzungseffizienz der Nutzpflanzen ab, welche je nach Standort in Kombination verschiedener Maßnahmen erreicht werden kann.

Bereits beobachtete, autonome Anpassungen an ein wärmeres Klima in Österreich sind die Verschiebung der Saattermine im Frühjahr oder Herbst, ein Wechsel der Pflanzensorten und Veränderungen in der Fruchtfolge, wobei hinsichtlich der Motive eine Unterscheidung zwischen Klimawandelanpassung und anderen Zielen (z. B. Intensivierung, Nutzung neuer Marktchancen) schwierig ist. Eine Vorverlegung des Saattermins ist bei im Frühjahr gesäten Kulturen eine sehr ertragseffektive Maßnahme (Eitzinger, 2007; Eitzinger et al., 2009 a–c), allerdings wegen der im Mittel schlechteren Bodenbefahrbarkeit nicht jedes Jahr umsetzbar. Eine Einschränkung der Vorverlegung der Saattermine ergibt sich auch aus dem erhöhten Frostrisiko. Durch die Vorverlegung des Saattermins wird einerseits die ertragsbildende Wachstumszeit verlängert oder konstant gehalten und andererseits sinkt die Gefahr von Trockenschäden im Fall früherer Blüte und Abreife.

Aufgrund der geringeren Verdunstung in einem Teil der Vegetationsentwicklung sind Winterungen im Allgemeinen einem geringeren Trockenheitsrisiko ausgesetzt als Sommerungen (Audsley et al., 2006; Eitzinger und Kubu, 2009). Daher kann als Anpassungsmaßnahme in den trockenen Anbauregionen Österreichs (z. B. Marchfeld) eine Verlagerung von Sommer- zu mehr Winterkulturen sinnvoll sein, soweit es phytosanitäre Erfordernisse in der Fruchtfolge zulassen und entsprechende Sorten mit ausreichender Winterhärte (Durum, Erbse, Ackerbohne) zur Verfügung stehen. Die Berücksichtigung von Pflanzenarten und -sorten mit effektiverer Wasserausnutzung in der Fruchtfolge während der trockenen Jahreszeiten stellt eine weitere Möglichkeit dar.

Der Anbau von Zwischenfrüchten wird häufig in Verbindung mit reduzierter Bodenbearbeitung angewandt. Zwischenfrüchte verringern die Nitratverlagerung ins Grundwasser sowie Bodenerosion und tragen zu einer Stabilisierung des Humushaushalts bei. Insbesondere durch intensive Durchwurzelung und höheren Regenwurmbesatz wird die Bodenstruktur verbessert und die Kohlenstoffspeicherung im Unterboden gefördert. Bei Erhöhung der Mitteltemperatur kommt organischem Input und Stickstoff-Konservierung durch Zwischenfrüchte eine verstärkte Bedeutung zu, um Verluste durch eine verstärkte herbstliche Mineralisierung zu verhindern (Olesen and Bindi, 2002). Bei Zunahme der sommerlichen Trockenperioden muss allerdings vermehrt auf ein wassersparendes Begrünungsmanagement geachtet werden (Bodner et al., 2010).

Durch die Veränderungen in der Phänologie der Nutzpflanzen sind zeitliche Verschiebungen im Ablauf des Düngungsregimes, der Pflanzenschutz- und Pflegemaßnahmen, der Ernte, etc. vorzunehmen. Diese erfolgen meist in Abstimmung mit der Pflanzenentwicklung und daher autonom. Eine Verschiebung der Arbeitsspitzen und der Arbeitsabläufe kann jedoch Anpassungen in der Arbeitsplanung und im notwendigen Maschinenpark notwendig machen um z. B. eine entsprechende Schlagkraft zu erhalten, was bei allen Feldarbeiten vor dem Monat Juni wegen der schlechteren Bodenbefahrbarkeit (geringere Anzahl von Feldarbeitstagen) einen höheren Einsatz bedingt (Eitzinger et al., 2013). Die Erntemonate ab Juni würden hingegen wegen verbesserter Feldarbeitsbedingungen eine Verringerung der Schlagkraft ermöglichen. Rodriguez et al. (2011) zeigen für australische Verhältnisse, dass derartige indirekte Effekte des Klimawandels einen stärkeren Einfluss haben können als direkte Ertragsänderungen durch Veränderungen im Klima selbst.

Landschaftsstrukturen, wie z. B. Windschutzanlagen oder agroforstwirtschaftliche Produktionssysteme, können das Mikroklima verändern und insbesondere in den niederschlagsarmen Regionen die Wassernutzungseffizienz der angebauten Kulturen verbessern, indem sie die Taubildung fördern, die Bodenevaporation reduzieren und auch die Winderosion ver-

ringern (Freyer et al., 2010; Frielinghaus et al., 1997; Surböck et al., 2006). In schneereichen Wintern können in einem trockenen Gebiet zusätzliche Schneeakkumulierungen im Bereich von Hecken einen bedeutenden Beitrag zur Niederschlagsmenge ausmachen (Gerersdorfer et al., 2009). Bodenschutzanlagen (z. B. Saumstreifen) vermindern Bodenerosion und fördern Nützlingspopulationen, die besonders im biologischen Landbau zur Schädlingskontrolle erwünscht sind und benötigt werden (vgl. Band 1 und Band 2).

Anpassungen im Bereich der Pflanzenzucht

Züchtung und Anbau besser angepasster Sorten sind effektive Maßnahmen, um dem Klimawandel zu begegnen. Zum Beispiel spielt beim Getreide die stark genetisch determinierte Temperaturabhängigkeit der Dauer der Kornfüllungsperiode eine große Rolle. Je länger diese Dauer bei höheren Temperaturen ist, desto größer ist das Ertragspotenzial in warmen Klimaten, ein von Züchtern schon lange erkanntes wesentliches Züchtungsmerkmal. Kombiniert man einen früheren Anbauzeitpunkt mit einer an ein wärmeres Klima besser angepassten Sorte, steigt das Ertragspotenzial stärker als bei nur einer dieser Maßnahmen (Alexandrov et al., 2002).

Aufgrund der zu erwartenden zunehmenden Hitze- und Trockenstressbelastungen für Nutzpflanzen im Sommerhalbjahr in den ackerbaulichen Hauptproduktionsgebieten (mit Schwerpunkt im Nordosten bis Südosten Österreichs) ist daher eine Züchtung auf verbesserte abiotische Stresstoleranz wesentlich.

Erfahrungen aus sommertrockenen Klimaten sind nur bedingt übertragbar, da viele unter diesen Bedingungen effektive Sorteneigenschaften eine Reduktion des Ertrages mit sich bringen (wie Frühreife oder sparsame Wassernutzung; Blum, 2011). Die Verbesserung der Wassernutzungseffizienz steht im Vordergrund, da sie mit einem hohen Ertrag kompatibel ist (Blum, 2005). Dabei ist besonders eine gute Durchwurzelung des Bodens von Bedeutung, deren züchterische Bestimmung jedoch bisher nur eingeschränkt möglich ist.

Die Züchtung auf Widerstandskraft gegen abiotischen Stress ist allerdings mit vielfältigen Schwierigkeiten verbunden. Dürre- und Hitzetoleranz sind komplexe Merkmale und nicht immer voneinander zu trennen. Weiters können die UV-B-Strahlung und bodennahes Ozon die Pflanzen schädigen. Quantitative Vererbung und eine Vielzahl von Anpassungsmechanismen führen bei der Zielgröße Ertrag zu gravierenden Genotyp-Umwelt-Interaktionen (Blum, 1989). Auch in Abhängigkeit von der zeitlichen Dauer und Schwere der Stresseinwirkung reagieren die Sorten variabel. Versuche unter kontrollierten Bedingungen (rain out-shelter, Phytotron, etc.) stehen den Unternehmen wegen hoher Kosten und begrenzter Kapazitäten kaum zur Verfügung. Die meisten der in Mitteleuropa tätigen Pflanzenzüchter haben daher wasserlimitierte Standorte in ihr Prüfnetz integriert. Österreichische Getreidezüchter nutzen für Kreuzungen gezielt den Genpool von Ländern mit semiariden Regionen (Ungarn, Slowakei, Kroatien, Rumänien, Türkei, etc.).

Diverse physiologische, morphologische und phänologische Merkmale wurden als Indikatoren der Trockentoleranz beschrieben (Ginkel et al., 1998; Paleg und Aspinall, 1981; Tahiro 2002). Ertragsdaten von mehreren Stressumwelten liefern die brauchbarsten Informationen (Flamm et al., 2012). Eine hohe Effizienz des Wurzelsystems und der Stomataregulation (Regelung der Spaltöffnungen an den Blättern) wird für die Leistungsstabilität als wesentlich erachtet. Auch eine ausgeprägte Wachsschicht kann die Transpiration einschränken. Bei Getreide lässt sich das durch Wassermangel hervorgerufene Einrollen der Blätter gut reproduzieren, was als Ausdruck genotypischer Empfindlichkeit jedoch überschätzt wird (Oberforster und Flamm, 2007).

Sorten, welche sich im Frühjahr rasch entwickeln und zeitig reifen, bilden einen Teil ihres Ertrags noch bei kühlerer Witterung und verbrauchen weniger Wasser („Escape-Strategie"). Frühreife kann in produktiven Umwelten aber einen Ertragsnachteil bedeuten. Deshalb wird bei Getreide versucht, ein mittelfrühes Ährenschieben mit mittlerer bis mittelspäter Reife zu kombinieren. Die dadurch verlängerte postflorale Periode soll das Ertragspotenzial anheben. Von Mais wird gefordert, dass er hohe Temperaturen zur Blütezeit und temporäre Trockenphasen möglichst schadlos erträgt. Molekulare Marker dürften in der Züchtung auf Trocken- und Hitzetoleranz künftig vermehrt Eingang finden (Schön et al., 2008). Die geänderte Dynamik von Krankheiten und Schädlingen wird im mehrjährigen Selektionsprozess meist kontinuierlich berücksichtigt. Zuletzt ist es zum Beispiel gelungen, aus der Wildart *Hordeum bulbosum* mittels konventioneller Züchtungsmethoden ein hochwirksames Resistenzgen gegen die Viröse Gelbverzwergung in die Kulturgerste einzuführen (Scholz et al., 2009). Diese Krankheit tritt durch die wärmere Herbstwitterung verstärkt auf (Jungmeier, 2010).

Den Herausforderungen des Klimawandels wird auch mittels gentechnischer Methoden zu begegnen versucht. In mehrere Pflanzenarten wurden artfremde Gene zur Steigerung der Trockentoleranz übertragen. Verglichen mit der bei Mais, Raps, Soja oder Baumwolle induzierten Herbizidtoleranz und Insektenresistenz, sind die praktischen Erfolge bisher bescheiden. In den USA wurde 2011 eine von den Firmen Monsanto und BASF entwickelte trockentolerante Maissorte zugelassen,

welche ein Gen des Bodenbakteriums *Bacillus subtilis* enthält. Dieser Mais brachte unter Bedingungen von Wasserknappheit geringfügig höhere Erträge als vergleichbare konventionelle Züchtungen (Scientific American, 2012). Weiters gelangen im Rahmen des Projekts „Water Efficient Maize for Africa (WEMA)" gentechnische Verfahren zur Anwendung. Seit dem Jahr 2007 werden in Australien transgene Weizenlinien im Freiland getestet. In Argentinien wurde ein Gen der Sonnenblume, welches zu einer gesteigerten Anpassung an Stressumwelten beiträgt, in Mais-, Weizen- und Sojabohnenpflanzen eingebracht. Bis dato sind daraus keine marktreifen Sorten entstanden (Anonymus, 2012). Es ist unwahrscheinlich, dass die Gentechnik zu raschen Fortschritten beim Merkmalskomplex Trocken- und Hitzetoleranz führt.

Der Klimawandel beeinflusst auch das angebaute Artenspektrum. Winterkulturen sind von den abgeschätzten Änderungen etwas weniger betroffen. Dank konsequenter züchterischer Aktivitäten hat die Malzqualität der Winterbraugerste ein Niveau erreicht, das den Ansprüchen der Verarbeitungswirtschaft genügt. Neuere Winterdurumsorten werden wegen verbesserter Frostfestigkeit zu einer Anbauausweitung beitragen. Längerfristig könnten auch Winterhafer, Sorghumhirsen und Wintererbse mehr Bedeutung erlangen. Aktuell wird zum Beispiel von der Saatzucht Gleisdorf Winterackerbohne zur Marktreife entwickelt; das LFZ Raumberg-Gumpenstein testet trockentolerante Futtergräser wie Aufrechte und Wehrlose Trespe (*Bromus erectus*, *B. inermis*), Rohr- und Furchenschwingel (*Festuca arundinacea, F. rupicola*), *Festulolium loliaceum* und Schmalblättrige Wiesenrispe (*Poa angustifiolia*) auf ihre Eignung für österreichische Bedingungen (Graiss et al., 2011).

Eine mögliche Anpassungsmaßnahme ist die Nutzung von wenig genutzten Arten („underutilized species"). Dies sind Arten, welche durch ihren schwachen Ertrag gegen die herkömmlichen Nutzpflanzen („comfort crops") nicht wettbewerbsfähig sind, aber durch ihre große Anzahl einer „genetischen Erosion" im Zuge des Klimawandels entgegenwirken. Die wenig genutzten Arten haben auf regionaler Ebene den Vorteil, dass sie an schwierige und komplexe Gegebenheiten angepasst sind (wie z. B. Trockenheit, magere Böden, Frosttoleranz) und teils hervorragende Nährstoffprofile für die menschliche Ernährung bieten (Padulosi et al., 2011).

Eine zentrale Frage aus gesellschaftlicher Sicht ist, ob die Pflanzenzucht ausreichend schnell voranschreitet, um den agronomischen Bedarf unter veränderten Klimabedingungen zu decken. Beispielsweise wird für die globale Getreideproduktion eine abnehmende Rate an Produktivitätszuwächsen (Fuglie und Wang, 2012) verzeichnet, die häufig mit abnehmenden Investitionen in Technologieentwicklung in Verbindung gebracht wird. Fuglie et al. (2012) zeigen, dass abnehmende staatliche Investitionen zumindest teilweise von privater Seite kompensiert werden, zweifeln aber an der Möglichkeit eines vollständigen Rückzuges öffentlicher Forschungsförderung zur Technologieentwicklung. Dies erscheint im Zusammenhang mit Klimawandel umso bedeutsamer, als es sich um weite Zeiträume mit hoher Unsicherheit handelt. Diese Argumente gelten sinngemäß auch für den folgenden Abschnitt.

Anpassungen im Bereich des Pflanzenschutzes

Im Hinblick auf eine nachhaltige Ressourcen- und Umweltschonung erscheint es sinnvoll, bei Anpassungsmaßnahmen im Pflanzenschutzbereich möglichst viele Einflussfaktoren auf die Pflanzengesundheit im Rahmen eines gesamtheitlichen integrierten Pflanzenproduktions-Konzepts zu berücksichtigen, welches sowohl präventive als auch kurative Maßnahmen umfasst. Das Risiko von Ertragsausfällen kann vermindert werden, indem die Vielfalt sowohl bei den Nutzpflanzen als auch bei den Pflanzenschutzmaßnahmen erhöht wird (Reidsma und Ewert, 2008). Im Rahmen der kurativen Pflanzenschutzmaßnahmen werden u. a. der Verfügbarkeit und Auswahl geeigneter Pflanzenschutzmittel und Applikationstechniken sowie adaptierter Applikationszeitpunkte und Intervalle eine große Bedeutung zukommen.

Bei den vorbeugenden Maßnahmen spielen u. a. die Gestaltung vielfältiger Fruchtfolgen (Freyer, 2003), adaptierte Aussaat, Pflanz- und Erntetermine und Kulturmaßnahmen eine wichtige Rolle. Auch eine vielfältig gegliederte Landschaft könnte in Verbindung mit weiten Fruchtfolgen das Schadrisiko senken, da neben anderen positiven Effekten auch Gegenspieler von Schadorganismen günstigere Entwicklungs- bzw. Überlebenschancen haben (Freyer et al., 2012).

Die verbesserte Prävention zur Vermeidung der Einschleppung von Schadorganismen bzw. die frühzeitige Entdeckung bei natürlicher Einwanderung durch neue in-situ Detektionsmethoden (Blümel, 2012), das verstärkte Monitoring von Schadorganismen zur Vermeidung der weiteren Ausbreitung und die Anpassung von Monitoringterminen gewinnen im Rahmen des Klimawandels an Bedeutung (Eitzinger et al., 2009d, Blümel, 2012). Besonders wichtig im chemischen Pflanzenschutz sind auch Prognosemethoden in Verbindung mit Schadensschwellen (Glauninger, 2011). Die genaue Erfassung der Witterungs- bzw. Klimabedingungen in Verbindung mit einem präzisen Monitoring, d. h. der Erfassung des zeitlichen Auftretens von Schadorganismen und deren Populationsentwicklung, ermöglicht die Erstellung von Entschei-

dungsmodellen für eine gezielte Bekämpfung des jeweiligen Schädlings, Krankheitserregers oder Unkrautbestands.

Es erschiene daher sinnvoll, die bereits seit Jahrzehnten in Österreich bestehenden Warn- und Prognosedienste für wirtschaftlich bedeutsame Schaderreger an Pflanzen, besonders im Rahmen der integrierten Produktion im Wein- und Obstbau, weiter zu optimieren (Eitzinger, 2010; vgl. Abschnitt 2.10).

Anpassungen im Wein- und Obstbau (Dauerkulturen)

Dauerkulturen zeichnen sich durch eine mehrjährige Umtriebszeit und dadurch langfristig angelegte Investitionen aus, wodurch Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel einer gründlichen Prüfung bedürfen. Zum Beispiel ist der Weinbau durch die relativ hohen und lang gebundenen Mittel der Kellertechnik und der Vermarktung stark an eine spezifisch angelegte Infrastruktur gebunden. Da im Weinbau insbesondere auch die Qualität des Weines eine große Rolle spielt, kann eine Klimaerwärmung bei der wärmeliebenden Weinkultur signifikante Anpassungen in den Produktionsabläufen erzwingen. Im Obstbau, der, abgesehen von Marillen (Aprikosen) oder Pfirsichen, vorwiegend in kühleren Regionen als jenen des Weinbaus stattfindet, sind manche mit dem Klimawandel verbundene Anpassungsoptionen durchaus differenziert zu bewerten, andere wiederum sind vergleichbar.

Abgesehen von zunehmenden Extremtemperaturen (Hitzeperioden) lassen sich für andere Witterungsextremereignisse unter Klimaszenarien bisher keine gesicherten Aussagen über mögliche Änderungen ableiten, insbesondere auf kleinräumiger Ebene (vgl. Band 1, Kapitel 5). Extremwetterereignisse besitzen aber für die Landwirtschaft und besonders bei Dauerkulturen aufgrund der hohen Flächenproduktivität ein sehr großes Schadpotenzial wodurch viele technische Maßnahmen zur Risikominderung auch unter den derzeitigen Klimabedingungen ökonomisch sinnvoll sind. Zum Beispiel werden Hagelschutznetze kostendeckend nur in Kulturen mit hohem Deckungsbeitrag, also vor allem im intensiven Obstbau eingesetzt. Befliegungen (z. B. Wolkeninjektion durch Silberjodid) werden regional ebenfalls durchgeführt (z. B. im Grazer Becken), die tatsächliche Wirkung ist hier aber schwer schlüssig nachweisbar (Pachatz, 2005).

Untersuchungen für Mitteleuropa zeigen, dass sich Spätfrostschäden je nach Region im Frühjahr abschwächen oder auch verstärken könnten (Eitzinger et al., 2013). Frostschutzmaßnahmen werden daher auch in einem wärmeren Klima in vielen Regionen von Bedeutung bleiben. Diese umfassen langfristig wirksame Maßnahmen, wie eine standortgerechte Planung der Anlage, die vor allem die Vermeidung von Kaltluftseen und die Auswahl von frostresistenteren Sorten berücksichtigt, und mittelfristig umsetzbare Maßnahmen, wie z. B. die Frostschutzberegnung.

Detaillierte Anpassungsmaßnahmen für den Wein- und Obstbau, insbesondere zur Bestandspflege und zu Produktionstechniken wurden von Redl (2006, 2007, 2008 a, b, 2011, 2012), Bauer und Fardossi (2008) und Bauer et al. (2009) ausführlich beschrieben. An anderer Stelle beschriebene Anpassungsmaßnahmen im Bereich des Bodenschutzes bzw. des Wasserhaushalts gelten sinngemäß auch für Dauerkulturen.

Anpassungen in der Grünlandbewirtschaftung mit Rinderhaltung

Grünland und dessen Bewirtschaftung spielt für die österreichische Landwirtschaft eine zentrale Rolle und erfüllt dabei zahlreiche Funktionen, die weit über die bloße Bereitstellung von Grundfutter für die Viehwirtschaft hinausgehen (Buchgraber et al., 2011; Pötsch, 2010). Dauergrünland – per Definition länger als fünf Jahre mit Grünlandvegetation bewachsen – stellt in Österreich mit insgesamt 1,7 Mio. ha die dominierende Kulturart dar und erstreckt sich dabei in all seinen unterschiedlichen Ausprägungen und Nutzungstypen über einen weiten Höhenstufen- und Hangneigungsgradienten. Knapp 60 000 (etwa 43 %) der insgesamt 140 000 österreichischen INVEKOS-Betriebe (das sind die im europäischen Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystem erfassten Landwirtschaftsbetriebe) werden als Grünlandbetriebe bezeichnet; d. h. sie bewirtschaften entweder ausschließlich Dauergrünland, bauen eventuell zusätzlich noch Feldfutter an oder bebauen maximal 10 % ihrer landwirtschaftlichen Nutzfläche auch noch mit anderen Kulturarten (BMLFUW, 2011b).

Im Vergleich zu den meisten anderen landwirtschaftlichen Kulturen stellen Pflanzenarten der Grünlandvegetation zwar geringere Ansprüche hinsichtlich Temperatur und Wärmesummen, sie weisen jedoch für ein optimales Wachstum einen deutlich höheren, spezifischen Wasserverbrauch auf. Grünland ist daher in einem besonderen Ausmaß von Klimaänderungen betroffen (Eitzinger et al., 2009a; Schaumberger, 2011) (vgl. Band 2).

Mögliche Maßnahmen bzw. Strategien zur Anpassung an den Klimawandel im Grünland sind:

- Einsatz trockenheitstoleranter Futterpflanzen durch verstärkte Selektion von trockenheitstoleranten Leguminosen- und Gräserarten bzw. -sorten für die Anlage bzw. Erneuerung von Grünland sowie deren Prüfung in Reinsaat

und Mischungen auf Ertragsleistung und Futterqualität. Dies könnte in weiterer Folge auch zu einer Ausweitung des derzeit bestehenden Spektrums von als ansaatwürdig eingestuften Pflanzenarten sowie spezieller Saatgutmischungen für Trockenlagen des Dauergrünlandes führen (Krautzer et al., 2010; Graiss et al., 2011). Der Einsatz geeigneter, bisher wenig verwendeter Sorten und von tiefwurzelnden Pflanzenarten, wie etwa Luzerne, ist eine weitere Option. Auch die Nutzung von Silomais und Getreide mit einem deutlich geringeren spezifischen Wasserverbrauch als Grünland zur Produktion von Ganzpflanzensilage (also Nutzung im grünen, frischen Zustand) bzw. der Anbau von Futtergetreide könnte zumindest in umbruchfähigen Lagen eine wirksame Anpassungsstrategie und Alternative darstellen, wobei hier potenzielle Konfliktfelder zur Gemeinsamen Agrarpolitik der EU (GAP) bestehen.

- Beregnung von Grünland: Bisher war die künstliche Beregnung primär Kulturen mit besonders hohen Deckungsbeiträgen vorbehalten, wenngleich in manchen Gebieten des Alpenraumes (Österreich, Schweiz, Südtirol) auch Grünland bewässert wurde und wird (Troxler et al., 1992; Calame et al., 1992), allenfalls auch kombiniert mit einer gezielten Ausbringung von flüssigem Wirtschaftsdünger.
- Anpassung von Nutzungsfrequenz und Düngungsintensität: Düngung und Nutzung stellen neben dem Pflanzenbestand und dessen Lenkung die zentralen Bewirtschaftungsfaktoren im Grünland dar; ihre laufende Anpassung an die vorliegenden Standortbedingungen (Topographie, Boden und Klima) ist eine wichtige Maßnahme (Pötsch, 2012). Der Einsatz der GIS-Technologie (Geoinformationssysteme) unter Einbeziehung von ertragsbestimmenden Standortkennwerten in einer möglichst hohen Flächenauflösung (idealerweise feldstück- bzw. nutzungstypbezogen) könnte auch im Grünland zu einer effizienteren Bewirtschaftung (z. B. durch präzisere Beratung) führen.
- Verstärkte Nutzung von Almen und höher gelegenen Flächen: Die Produktivität und Leistungsfähigkeit von Almflächen und Hochlagen wird primär durch eine kurze Vegetationszeit und im Vergleich zu Tallagen niedrigere Temperaturen limitiert. Durch die zu erwartenden Klimaveränderungen könnten zukünftig daher auch hochgelegene Flächen wieder stärker zur Produktion von Grundfutter genutzt und etwaige Ertragsminderungen auf den Heimflächen zumindest teilweise ausgeglichen werden. Dabei ist eine erschwerte Bewirtschaftung zu berücksichtigen, besonders hinsichtlich Ernte und Düngung.
- Die Grünlandflächen Österreichs erstrecken sich über sehr diverse Klimazonen, was unmittelbare Folgen auf die Erträge hat (Schaumberger, 2012). Steigende Temperaturen können in den niederschlagsreichen Regionen Österreichs zu Mehrerträgen führen (Schönhart et al., 2013; Eitzinger et al., 2009a). In einem solchen Fall könnte Anpassung zu einer Erhöhung der Tierbestände, einer Aufgabe marginaler Standorte oder einer Intensivierung führen.

Anpassungen im Bereich der Tierhaltung

Neben dem Einfluss auf die Quantität und Qualität der Tierfutterproduktion hat der Klimawandel auch direkten Einfluss auf die Leistungsfähigkeit und das Wohlbefinden der Nutztiere. Konsequenzen des Klimawandels für die verschiedenen Bereiche der Tierhaltung hinsichtlich der Ansprüche von Nutztieren, deren Gesundheit und Leistungsfähigkeit wurden von Grummer (2009) beschrieben (vgl. Band 2).

Als empfehlenswerte Anpassungsmaßnahmen im Bereich der Tierhaltung sind zu nennen (Anpassungsmaßnahmen im Bereich der Fischereiwirtschaft werden in Abschnitt 2.4.2 behandelt):

- Die Anpassung der Stallsysteme hinsichtlich der Sicherstellung des Wohlbefindens der Tiere kann Leistungsabfälle oder Ausfälle bei zunehmenden Hitzeperioden vermeiden. Hochleistungstiere sind hierbei am stärksten betroffen. Ein wichtiges Kriterium ist die Ausfallssicherheit. Dem Risiko von Stromausfällen (insbesondere bei Klima-, Lüftungs- und Milchkühlanlagen) kann mit netzunabhängiger Stromversorgung begegnet werden, etwa durch Installation von Notstromaggregaten. Technische Innovationen, wie zum Beispiel der Einsatz von Solarenergie, können Energiebedarf und Emissionen reduzieren.
- Die Kühlung der Stallungen mittels Wassernebel oder Kühlplatten wird in Zukunft eine vermehrte Rolle spielen, jedoch hängt deren Nutzen auch von der zu erwartenden Luftfeuchte am Standort der Betriebe ab. Bei anhaltender Erderwärmung wird ein Nach- oder Aufrüsten einer Kühlung in Aufzuchtbetrieben unumgänglich sein (Valiño et al., 2010).
- Offene Stallsysteme mit freier Bewegungsmöglichkeit der Tiere ins Freie bieten neben anderen Vorteilen die größte Sicherheit für das Wohlbefinden der Tiere. Freier Auslauf mit entsprechenden Unterstandmöglichkeiten (Schatten) bzw. Abkühlmöglichkeiten (z. B. Rinderduschen, Suhlen für Schweine) sind besser zu bewerten als klimatisch schlecht geregelte Stallsysteme (Grummer, 2009).

- Es können Wechselwirkungen zwischen Hygienemaßnahmen zur Unterbindung der Verbreitung von Krankheiten und deren Vektoren und anderen Anpassungsmaßnahmen wie dem Haltungssystem oder der Stalltechnik auftreten; auch Hygienemaßnahmen in der Milchproduktion (besonders die Einhaltung der Kühlketten) sind zu beachten.
- Ein effektives Monitoring von Krankheiten bei Nutztieren bzw. bei von Nutztieren auf Menschen übertragbare Krankheiten sowie deren Vektoren ist zur Krankheitsvorsorge wichtig. Dafür sind geeignete, flexible Maßnahmen in der Tiermedizin wesentlich.

Anpassungen im biologischen Landbau

Im biologischen Landbau gelten die weiter oben genannten Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft prinzipiell ebenso. Aufgrund von Besonderheiten dieses Bewirtschaftungssystems unterscheiden sich aber die Gewichtungen und die Bedeutung einzelner Anpassungsmaßnahmen teilweise von denen im konventionellen Landbau.

Als Folge der spezifischen Rahmenbedingungen der Bewirtschaftung im biologischen Landbau (IFOAM, 2014; Köpke und Haas, 1995) zeigen biologisch bewirtschaftete Böden häufig höhere Humusgehalte (Mäder et al., 2002; Niggli et al., 2007; Pimentel et al., 2005), einen höheren Porenanteil bzw. eine geringere Lagerungsdichte (Freyer et al., 2012), ein erhöhtes Wasser- und Luftspeicherungsvermögen (Pimentel et al., 2005), eine größere Aggregatstabilität, ein höheres Infiltrationsvermögen (Lotter et al., 2003) und eine verringerte Erosivität (Mäder et al., 2002; Reganold et al., 1987), eine höhere bodenbiologische Aktivität und mikrobielle Diversität (Mäder et al., 2002), geringere Nitratauswaschung (Mondelaers et al., 2009) und geringere THG-Emissionen pro Flächeneinheit (Olesen et al., 2006; Rahmann et al., 2008).

Biologischer Landbau sichert und erhöht so letztlich die langfristige Produktivität von Böden und verleiht dem Anbausystem eine größere Stabilität (Thrupp, 2000). Auch erhöht sich die Resilienz der Böden und des Anbausystems gegenüber Witterungsextremen wie Trockenperioden oder Starkregenereignissen, die infolge des Klimawandels vermehrt zu erwarten sind (Niggli et al., 2007). Dem biologischen Landbau wird daher in mehreren Studien eine höhere Anpassungsfähigkeit an die Auswirkungen des Klimawandels zugeschrieben (Borron, 2006; Niggli et al., 2007; Lindenthal et al., 2011).

Folgende Anpassungsmaßnahmen sind speziell für den biologischen Landbau von Bedeutung, können aber im übertragenen Sinn auch in der konventionellen Landwirtschaft eine Rolle spielen:

- Humus- und Nährstoffdynamik: Höhere Temperaturen im Winterhalbjahr werden den Umsatz der organischen Bodensubstanz erhöhen (Feichtinger und Stenitzer, 1995). Um Humusverluste zu vermeiden, ist es erforderlich, auf eine gute oder sogar vermehrte Rückfuhr organischer Substanz in den Boden zu achten. Dies erfordert ggf. einen erhöhten Anteil humusmehrender Kulturarten, wie Futterleguminosen, bzw. einen verringerten Anteil humuszehrender Kulturen, wie Hackfrüchten, in der Fruchtfolge. Ein erhöhter Umsatz der organischen Bodensubstanz im Winter bedeutet auch eine verstärkte Stickstoff-Mineralisierung zu einer Zeit, in der die Stickstoffaufnahme der Pflanzen gering und die Nitratauswaschungsgefahr hoch sind. Mögliche Anpassungsmaßnahmen wären eine spätere Grundbodenbearbeitung im Herbst, ein Verschieben der Bodenbearbeitung ins Frühjahr bei nachfolgenden Sommerungen oder der vermehrte Anbau von Zwischenfrucht-Begrünungen (Szerencsits et al., 2011), um Stickstoff über den Winter zu binden. Der Anbau von Zwischenfrüchten als Begrünungen kann aber durch zunehmende Wasserkonkurrenz zu den Hauptkulturen risikoreicher und damit unattraktiver werden. Dem kann durch geeignete Wahl von Bodenbearbeitungsverfahren (siehe unten) und -zeitpunkt begegnet werden.
- Leguminosen als tragendes Element der Fruchtfolgen: Leguminosen haben eine große Bedeutung in den Fruchtfolgen des biologischen Landbaus; aufgrund der biologischen Stickstoff-Fixierung, der Unkrautunterdrückung und Humusmehrung sind sie im Zusammenhang mit den Auswirkungen des Klimawandels besonders relevant (Gollner et al., 2012). Vor allem im Osten Österreichs sind höhere Anforderungen an die Trockenheitstoleranz der Nutzpflanzen zu erwarten. Im biologischen Landbau gilt dies insbesondere für Luzerne als wichtigste Futterleguminose für dieses Gebiet. Verstärkte Anstrengungen bei der Züchtung trockenheitstoleranter Sorten wären hier hilfreich. Da die Möglichkeiten des kurativen Pflanzenschutzes im biologischen Landbau begrenzt sind, wird sich der Anbau anfälliger Kulturen, wie z. B. von Erbsen (McDonald und Peck, 2009), in Zukunft voraussichtlich verringern, während vorbeugende Pflanzenschutz-Maßnahmen, wie Fruchtfolgegestaltung und Förderung der Fruchtbarkeit und des antiphytopathogenen Potenzials der Böden, an Bedeutung gewinnen werden.

- Bodenbearbeitung: Die Bodenbearbeitung ist im biologischen Landbau in höherem Maße als im konventionellen Landbau ein Verfahren zur Unkrautkontrolle. Diese ist mit Pflugeinsatz leichter zu erzielen als mit pfluglosen Verfahren. Pflugeinsatz erhöht aber die Bodenwasser-Verdunstung und damit unproduktive Wasserverluste sowie die Erosionsgefahr. Pfluglose Bodenbearbeitungsverfahren spielen deswegen im biologischen Landbau vor allem auf Trockenstandorten im Osten Österreichs eine zunehmende Rolle. In feuchteren Gebieten wird hauptsächlich auf einen reduzierten Pflugeinsatz gesetzt. Möglichkeiten der Reduktion des Pflugeinsatzes ergeben sich bei bestimmten Kulturen der Fruchtfolge, durch Verringerung der Bodenbearbeitungstiefe und durch Verzicht auf Pflugbodenbearbeitung zur Stoppelbearbeitung im Sommer, wenn die Verdunstung besonders hoch ist (Gadermaier et al., 2012).

Maßnahmen einer ressourcenschonenden Bewirtschaftung und Anpassung an den Klimawandel setzen auf der Ebene des landwirtschaftlichen Betriebs an. Sie entfalten ihre volle Wirkung (z. B. auf Biodiversität oder Gewässerschadstoffeinträge) aber erst bei einer überbetrieblichen bis regionalen Umsetzung (Freyer et al., 2007).

Anpassungen in der Bodenbearbeitung und für den Boden- und Erosionsschutz

Die erosive Kraft des Niederschlags wird als Regenerosivität bezeichnet. Eine Zunahme der Regenerosivität (vgl. Abschnitt 2.4 und Band 2) würde ohne geeignete Schutzmaßnahmen zu höheren Bodenerosionsraten führen (Klik und Eitzinger, 2010). Hierbei ist es vor allem die Niederschlagsintensität, welche die wesentliche Rolle spielt, da sie einen nicht-linearen Einfluss auf den Erosionsprozess ausübt. Zumeist wird ein ausreichender Schutz nicht durch eine einzige, sondern durch die Kombination mehrerer Maßnahmen gewährleistet. Flächenbezogene Schutzmaßnahmen sind hierbei effektiver.

Eine Herausforderung besteht dabei in den langen Zeithorizonten, über die Bodenerosion, abgesehen von Extremereignissen, wirken kann. Kurzfristig können Erosionseffekte unbemerkt bleiben bzw. werden diese unter Umständen negiert, weil sie den ökonomischen Interessen der LandnutzerInnen entgegenstehen (Montgomery, 2007). Aus gesellschaftlicher Sicht erscheinen daher politische Maßnahmen des Bodenschutzes sinnvoll. Beispiele sind die Erosionsschutzmaßnahmen im Agrarumweltprogramm ÖPUL.

Folgende Bodenschutzmaßnahmen können durch den Klimawandel an Bedeutung gewinnen:

- Veränderung der Fruchtfolge und ganzjährige Bedeckung des Bodens durch Vermeidung von weiten Reihenkulturen sowie Anbau von Zwischenfrüchten. Insbesondere in Hanglagen sind Fruchtfolgen mit hohem Bedeckungsanteil jenen mit hohem Hackfruchtanteil bzw. Reihenkulturen vorzuziehen. Zum Beispiel stuften Scholz et al. (2009) für den Raum Oberösterreich den Zuckerrübenanbau unter Klimaszenarien des 21. Jahrhunderts mit Pflugbearbeitung wegen zu hoher Erosionsraten (trotz einer Abnahme von 11–24 % im Vergleich zur Bezugsperiode) als nicht nachhaltig ein. Bei konservierender Bodenbearbeitung ergab sich jedoch eine Reduktion des Bodenabtragpotenzials von 49–87 %.
- Während des Winterhalbjahres kann eine Wintergründecke oder Zwischenfrucht angebaut werden. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, Sommergetreide durch Winterungen zu ersetzen.
- Im Weinbau stellt die Begrünung oder eine Mulchauflage der Fahrgassen eine effektive Maßnahme zur Erosionsverminderung sowie zur Verbesserung der Bodenqualität dar (Bazzoffi und Chisci, 1999; Gril et al., 1989; Messer, 1980; Tropeano, 1983).
- Änderung der Bodenbearbeitung, Erhöhung der Bodenbedeckung durch Belassen von Pflanzenresten auf der Bodenoberfläche nach der Ernte.
- Konservierende Bodenbearbeitung durch reduzierte Bearbeitungsintensität, geringe Tiefe des mechanischen Eingriffes (keine Bodenwendung, Pflugverzicht) und Belassen der Ernterückstände an der Bodenoberfläche (Mulch). Zahlreiche Studien unterstreichen die positiven Auswirkungen konservierender Bodenbearbeitung (Auerswald et al., 1994; Choudhary et al., 1997; Klik, 2003; Mannering, 1987; Meyer et al., 1999; Tebrügge und Düring, 1999). Strauss et al. (2003) zeigen, dass beim Bodenabtrag Mulchsaat einen Wirkungsgrad von 74 % und Direktsaat einen von 87 % aufweisen. Eine erfolgreiche Implementierung setzt voraus, dass Probleme durch einen eventuell erhöhten Unkrautdruck standortspezifisch gelöst werden.
- Stabile Bodenaggregate leisten größeren Widerstand gegen die erosiven Kräfte und vermindern somit die Bodenerosion. Die Aggregatstabilität hängt vom Zusammenspiel physikalischer, chemischer und biologischer Kennwerte ab. Die größte Bedeutung kommt dabei der

organischen Substanz zu, die auch das Bodenleben fördert. Im Ackerbau kommt dem Regenwurmbesatz eine besonders wichtige Rolle bei der Förderung der Aggregatstabilität zu. In einigen Ländern werden seit wenigen Jahren Bodenzuschlagsstoffe zur Erosionsvermeidung verwendet. Mit dem Ausbringen von Bodenzuschlagsstoffen können ebenfalls stabile Bodenaggregate gefördert werden. So fördern z. B. einige organische synthetische Polymere, wie etwa das wasserlösliche Polyacrylamid (PAM), die Verbindung feiner Bodenpartikel zu größeren Aggregaten und eine höhere Bodeninfiltration (Flanagan et al., 2003). Das Einbringen von Gips (Kalziumsulfat) in den Boden verbessert ebenfalls die Bodenstruktur und die Infiltrationsfähigkeit, was verminderten Abfluss und Bodenabtrag zur Folge hat.
- Veränderung der Landnutzungsanteile: Aggregatstabilität nimmt in folgender Reihe der Landnutzung zu: ackerbauliche Nutzung – Wald – Grünland (Kukal et al., 2007).
- Die Umstellung von konventioneller auf bodenschonende Bearbeitung führt in Kombination mit dem Anbau von Zwischenfrüchten (Klik et al., 1998) zur Verbesserung der Infiltration, der Bodenwasserspeicherkapazität (vgl. Abschnitt 2.4.2), des Humusgehalts (Hartl et al., 2012) und der Aggregatstabilität (Klik und Hofmann, 2011). Zusätzlich wird auch die Auswaschung von Nährstoffen ins Grundwasser vermindert (vgl. Abschnitt 2.2.1). Mitter et al. (2013) modellieren Bodenerosion auf Ackerflächen im niederösterreichische Mostviertel und weisen Zwischenfruchtanbau und reduzierte Bodenbearbeitung als effektive und ökonomisch interessante Maßnahmen unter den derzeitigen ÖPUL-Bedingungen aus. Freudenschuss et al. (2010) errechneten auf Basis von langjährigen Feldversuchsdaten relative Anstiege des organischen Kohlenstoffes im Boden um bis zu 9 %. Die ÖPUL-Maßnahmen (z. B. Begrünung von Ackerflächen, Mulch- und Direktsaat, integrierte Produktion im Weinbau, Begrünung im Weinbau) führten z. B. in den vergangenen 15 bis 20 Jahren auf allen untersuchten Standorten im Flach- und Hügelland, im Alpenvorland sowie im Waldviertel zu einem Anstieg der mittleren Humusgehalte um ca. 0,1–0,4 % (Baumgarten et al., 2011).
- Bodenverdichtung auf landwirtschaftlichen Flächen ist eine Hauptursache für verminderte Bodeninfiltration. Sie entsteht zumeist durch zu hohe Radlasten und durch mehrfaches Überrollen derselben Spur oder durch das Furchenrad beim Pflügen, wenn beim Befahren der Boden zu feucht bzw. zu locker ist. Zur Vermeidung gibt es eine Reihe wirkungsvoller Maßnahmen. Zu den gerätetechnischen Maßnahmen zählen etwa die Verwendung von Onland-Pflügen, das Umrüsten von Aufsatteltechnik auf gezogene Technik und die Optimierung des Reifeninnendruckes. Ackerbauliche Maßnahmen umfassen die pfluglose Bestellung des Ackers, Anbau in Direktsaat- oder Mulchsaatverfahren, das Pflügen im Sommer, die standortgerechte Fruchtartenwahl für vernässungs- bzw. verdichtungsempfindliche Standorte, die Verkürzung der Feldlängen und damit Verringerung der Last- und Leerfahrten sowie die Begrünung von stark gefährdeten Teilflächen.
- Erosionsvermindernde Flurgestaltung: Zur Erosionsverminderung können quer zum Gefälle und zur Hauptwindrichtung Streifen mit Wechsel der Fruchtart oder abflussbremsende Gras- oder Saumstreifen angelegt werden. Schlagunterteilung durch Erosionsschutzstreifen bzw. Wege mit Gräben quer zum Gefälle verringern ebenfalls den Bodenabtrag. Eine Bearbeitung in Falllinie erhöht hingegen die Erosion.
- Anlage von Gewässerrandstreifen: Die Anlage von Gewässerrandstreifen stellt eine zusätzliche Maßnahme gegen den Eintrag von Sedimenten in aquatische Ökosysteme dar. Die Wirksamkeit derartiger Pufferstreifen hängt von ihrer Breite, dem Hanggefälle, der Bodenart sowie von der Niederschlagshöhe und dem dadurch hervorgerufenen Oberflächenabfluss ab (Tollner et al., 1976; Dillaha et al., 1989). Die Anlage von begrasten Abflussmulden in Geländetiefenlinien zum Rückhalt von Sediment ist in erosionsgefährdeten Landschaften ebenfalls zu empfehlen (Fiener and Auerswald, 2009).

Anpassungen in der landwirtschaftlichen Bewässerung

Landwirtschaftliche Bewässerung findet in Österreich hauptsächlich in den niederschlagsärmeren Ackerbauregionen statt, mit einem Schwerpunkt in Ostösterreich (vgl. Band 2, Kapitel 2). Studien zeigen, dass vor allem im Marchfeld und im Weinviertel insbesondere in den Klimaszenarien, die Niederschlagsabnahmen im Sommerhalbjahr anzeigen (vgl. Band 2, Kapitel 3), mit einer Zunahme des Bewässerungsbedarfes zur Erhaltung des heutigen Ertragsniveaus (Ertragssicherung) zu rechnen ist (vgl. Band 2, Kapitel 2, Kromp-Kolb et al., 2007; Thaler et al., 2012; Trnka et al., 2011; WPDA, 2011). Die Zunahmen im relativen Wasserbedarf für die Hauptackerbaugebiete im Osten Österreichs liegen unter diesen Klimaveränderungen für Getreide im Mittel bei ca. +20 % bis zu den 2050er Jahren. Im Marchfeld ergibt dies bei den überwiegend mittelschweren Böden einen Zusatzwasserbedarf bei Winterweizen

Risikominderungsstrategien landwirtschaftlicher Betriebe

Mengen- und Preisabsicherung	Betriebsorganisation	Effizienzsteigerung
• Schadensbezogene Versicherungen • Indexbezogene Versicherungen • Produktionstechnische Maßnahmen (z. B. Bewässerung) • Warenterminbörse • Lieferverträge	• Innerbetrieblicher Risikoausgleich: - Diversifikation / Alternativen - Auswahl risikoarmer Prozesse - Überkapazitäten (Puffer) • Intertemporärer Risikoausgleich: - Liquiditätsreserven - Lagerhaltung	• Monitoring von Betriebsabläufen • Managementpläne • Prozesssteuerung / Präzisionslandwirtschaft

Abbildung 2.3 Ausgewählte Anpassungsmöglichkeiten zur Risikominderung in der landwirtschaftlichen Produktion. Quelle: Gröbmaier et al. (2009)
Figure 2.3 Selected options for risk reduction in agricultural production. Source: Gröbmaier et al. (2009)

von ca. 30 mm – das entspricht ungefähr einer Beregnungsgabe – für die 2050er-Jahre mit Berücksichtigung des wassersparenden CO_2-Effekts. Bei Sommerkulturen mit hohem Wasserbedarf (wie Mais, Zuckerrübe oder Sojabohne) dürfte der zusätzliche Bewässerungsbedarf (bei gleichem Ertragsniveau) mit bis zu ca. 80 mm deutlich höher liegen (Eitzinger et al., 2009a, 2010). Dauerkulturen wie Grünland, Wein oder Obstgehölze sind in den niederschlagsarmen Regionen in ähnlicher Weise betroffen. Insgesamt, aber insbesondere bei einer möglichen Ausdehnung der bewässerten Flächen, wird die Landwirtschaft in Zukunft mit einer steigenden Konkurrenz um die Ressource Wasser zu rechnen haben (OECD, 2012).

Die meisten beregnungswürdigen Sommerkulturen wie Mais, Kartoffel, Zuckerrübe weisen derzeit im Marchfeld einen mittleren optimalen Beregnungswasserbedarf von 150–200 mm auf, was einer Applikationsmenge von 1 500 bis 2 000 m^3 pro Hektar Ackerfläche und Jahr entspricht. Diese pro Hektar bewässerte Menge verbrauchen etwa 15–20 Haushalte während der Bewässerungsperiode (Mai bis September). Anpassungsmaßnahmen an den künftig zunehmenden Wasserbedarf bestehen nicht nur in höheren Bewässerungsmengen bei optimaler Bewässerung, sondern insbesondere auch in der Steigerung der Bewässerungseffizienz bei derzeit unangepasster Bewässerung (vgl. Abschnitt 2.6.2). Hierbei geht es vor allem um die Reduktion der Evaporation bzw. unproduktiven Verdunstung. Dies kann durch geeignete Wahl des Bewässerungssystems und des Bewässerungszeitpunkts erfolgen. Bei ganzflächigen Bewässerungsverfahren wie der Beregnung verdunstet ein wesentlicher Teil des applizierten Wassers durch Evaporation von Boden- und Pflanzenoberflächen, bevor es in den Boden infiltriert. Die Tropfbewässerung ist energieeffizienter als z. B. die Feldnetzberegnung (Kleinregnerflügel) und weist eine Wassernutzungseffizienz von bis zu 95 % auf, d. h. nahezu die gesamte applizierte Wassermenge wird zur Deckung des Pflanzenwasserbedarfs verbraucht. Dieser Wirkungsgrad wird nur noch von Unterflurbewässerungsverfahren übertroffen. Zur Verringerung der Evaporation kann die Bewässerung während der Nachtstunden bzw. bei Windstille und kühlen Temperaturen durchgeführt werden.

Die optimale Festlegung von Bewässerungsgaben und -zeitpunkten kann ebenfalls eine Wassereinsparung bringen. Die genaue Berechnung von Applikationsmengen kann mit Hilfe verschiedener verfügbarer Modelle und Methoden erfolgen, der optimale Zeitpunkt der Bewässerung kann durch Messung des Bodenwasserhaushalts des Pflanzenbestands bestimmt werden. Zum Beispiel stehen zahlreiche Sensoren zur Bodenwassergehaltsmessung zur Verfügung (Evett et al., 2011), welche die Daten online in Echtzeit an den Landwirt senden können. Durch „Precision Farming"-Methoden kann zusätzlich die räumliche Bodenheterogenität von Ackerschlägen berücksichtigt werden. Prognosen für Bewässerungsmengen und -zeitpunkte werden heute auch durch Fernerkundungsmethoden ermittelt (z. B. Trockenheitsmonitoring), über das Internet publiziert und den Landwirten zeitnah zugänglich gemacht. Auch im Bereich der Bewässerungstechnologie ist die Frage der öffentlichen Verantwortung in der Förderung der Technologieentwicklung zu klären. Österreich könnte von Ländern mit ariden Klimabedingungen, wie z. B. Israel, lernen, die bereits über gut entwickelte wassersparende Bewässerungstechnologien sowie Institutionen zur Regelung von Wasserverfügbarkeit und -verbrauch verfügen.

Tabelle 2.2 Einflussfaktoren auf die langfristige Durchführbarkeit und Akzeptanz von Anpassungsmaßnahmen in der Landwirtschaft. Nach Eitzinger et al. (2009a)

Table 2.2 Determinants of the long-term feasibility and acceptance of adaptation options in agriculture. Adapted from Eitzinger et al. (2009a)

Positive Faktoren	Negative Faktoren
• Nachhaltiger, langfristiger Effekt	• Nicht nachhaltiger, nur kurzfristiger Effekt
• Höhere Erträge, bessere Ertragsstabilität	• Geringere Erträge, höhere Ertragsvariabilität
• Bessere Qualität der produzierten Nahrungsmittel und anderer lanwirtschaftlicher Produkte.	• Schlechtere Qualität der produzierten Nahrungsmittel und anderer lanwirtschaftlicher Produkte.
• Geringeres Produktionsrisiko	• Höheres Produktionsrisiko
• Niedrige Investitionskosten	• Hohe Investitionskosten
• Steigender Nettogewinn oder Deckungsbeitrag	• Sinkender Nettogewinn oder Deckungsbeitrag
• Effizientere Nutzung und Schonung natürlicher Ressourcen	• Zusätzlicher Verbrauch und Belastung natürlicher Ressourcen
• Geringere oder akzeptable Arbeitsbelastung	• Höhere Arbeitsbelastung
• Förderung der Artenvielfalt	• Verringerung der Artenvielfalt
• Positive produktionstechnische Wechselwirkungen	• Negative produktionstechnische Wechselwirkungen
• Soziale Akzeptanz (Anerkennung) und persönliche Motivation (z. B. Landschaftsbild)	• Geringe soziale Akzeptanz oder persönliche Motivation

Risikoverminderungsstrategien in der Landwirtschaft

Da die Landwirtschaft direkt von den klimatischen Bedingungen abhängt, ist sie der von Veränderungen der Umwelt am stärksten betroffene Sektor (vgl. Band 2, Kapitel 6). Aus der Sicht des Landwirtes stehen verschiedene Strategien zur Verfügung, um einerseits das Risiko eines direkten physikalischen Schadens (durch klimatische Extreme) zu vermindern (wie oben beschrieben) oder andererseits um den ökonomischen Schaden eines Schadereignisses zu begrenzen. Im Umkehrschluss kann es darum gehen, an positiven Entwicklungen möglichst gut zu partizipieren.

Als betriebliche Risikoverminderungsstrategien (Gröbmaier et al., 2009) sind Mengen- und Preisabsicherung, organisatorische Gestaltung betrieblicher Abläufe und die Verbesserung der nachträglichen Anpassungsfähigkeit zu nennen (Abbildung 2.3).

Eine wichtige Absicherungsmaßnahme in der Landwirtschaft besteht in der Versicherung gegen Wetterextreme, deren Veränderung unter Klimaszenarien allerdings schwer abgeschätzt werden kann (vgl. Band 1, Kapitel 5). Dass sich klimatische Extremereignisse in ihrem Auftreten (Häufigkeit, Stärke, Schadensausmaß) verändern können, trifft auch die Versicherungen, die sich z. B. bei einer deutlichen Zunahme an neue Risikoprofile anpassen müssen (Bielza Diaz et al., 2009; Garrido et al., 2010). Auch alternative Versicherungsstrategien wie Wetterderivate (Wetterindex basierte Versicherung) können in manchen Bereichen (wie bei Dürreschäden) ökonomisch Sinn machen (Prettenthaler et al., 2006). Risikoverminderungsstrategien sollten jedoch auch immer Maßnahmen zur Verminderung der Verwundbarkeit (technische Anpassungsmaßnahmen wie Verwendung von Hagelschutznetzen, Installierung von Bewässerungsanlagen, mehrere Standbeine der betrieblichen Wertschöpfung, etc.) mit berücksichtigen, um eine wirtschaftliche und nachhaltig optimale Kombination zu finden. Über die Prämiengestaltung können z. B. auch Versicherungen verschiedene begleitende technische Anpassungsmaßnahmen für bestimmte Risiken fördern. Für Schäden aus extremen Witterungsereignissen, welche die gegebenen Risikoabsicherungsmaßnahmen nicht abdecken, sollten allerdings ständig ausreichende öffentliche Mittel bereitstehen (wie z. B. aus dem Katastrophenfonds).

Umfassende Ertragsversicherungssysteme findet man meist in Ländern mit starker öffentlicher Einbindung in landwirtschaftliche Versicherungen, wie Österreich, Spanien oder den USA. Bei der Risikovorsorge nimmt Österreich mit der umfassendsten Produktpalette im Vergleich zu Agrarversicherungen in anderen EU-Mitgliedsländern eine Vorreiterrolle ein (Weinberger, 2010). Durch das bestehende System des „Private-Public-Partnership“, also durch das Zusammenspiel zwischen Landwirtschaft, öffentlicher Hand und Versicherungswirtschaft, können derartige klimatische Risiken leichter bewältigt werden. Zum Beispiel sind 85 % der landwirtschaftlichen Ackerfläche bei der Österreichischen Hagelversicherung (www.hagel.at) gegen Hagel versichert, über 70 % davon auch gegen andere Risiken (Mehrgefahrenversicherung). Zwischen 1985 und 2013 wuchs die versicherte Fläche von 600 000 ha auf knapp 1 300 000 ha.

2.2.3 Synergien und Trade-offs von Anpassung und THG-Minderung

Grundsätzlich werden häufig die ökonomisch attraktivsten oder zumindest die ökonomisch akzeptablen Anpassungsmaß-

Tabelle 2.3 Auswahl von landwirtschaftlichen Anpassungsmaßnahmen (inkl. Landnutzung) mit deutlicher Wirkung auf Treibhausgasemissionen, andere Umweltwechselwirkungen und deren Bewertung

Table 2.3 Selected agricultural adaptation options (including land use) with substantial effect on greenhouse gas emissions, other environmental effects, and their valuation

Anpassungsmaßnahme	THG-Minderung: Emissionssteigerung (–) oder -reduktion (+)	Andere Wirkungen auf die Umwelt und andere Bereiche
	Bewertung[1]	Bewertung[1]
Reduzierte Bodenbearbeitung, Minimalbodenbearbeitung, Pflugverzicht	(+) Kohlenstoffanreicherung im Boden, Humusaufbau, geringerer Kraftstoffverbrauch bei der Bodenbearbeitung	(+) Reduktion der Bodenevaporation, reduzierte Bodenerosion, stabilere Bodenstruktur und bessere Bodenbefahrbarkeit (–) ev. höherer Herbizideinsatz
Möglichst dauerhafte Mulchdecken im Ackerbau und bei Dauerkulturen	(+) Schutz der Bodenkohlenstoffreserven gegen Bodenerosion	(+) Bodenerosionsschutz, Reduktion der Bodenevaporation
Grünlandumbruch für Feldfutterbau	(–) Hoher Humusabbau	(–) Reduktion der Biodiversität, erhöhte Bodenerosion, erhöhte Nitratauswaschung, (+) höhere Flächenproduktivität
Früherer Anbau von Kulturen		(+) effizientere Wassernutzung, höheres Ertragspotenzial, (–) Gefahr von Bodenverdichtung wegen schlechterer Bodenbefahrbarkeit durch Nässe
Züchtung und Anbau besser angepasster Sorten	(+) bessere Ausnutzung des Boden-N, verringerte N-Verluste (in Luft und Wasser)	(+) effizientere Wassernutzung, höheres Ertragspotenzial
Angepasste Methoden der N-Düngung (z. B. Precision Farming)	(+) geringere Lachgasemissionen	(+) geringere N-Auswaschung ins Grundwasser
Biomasseproduktion für energetische Nutzung	(+) Potenzial als alternative Energiequelle, aber abhängig von der eingesetzten Technologie, je nach Produktionsmethode mögliche positive oder negative Effekte für den Bodenhumusaufbau und für Bodenschutz.	(–) Je nach aktueller Marktlage mögliche Konkurrenz zur Produktion von Nahrungsmittel (und anderer Produkte). Diese kann z. B. durch Zwischenfrucht-Nutzung, integrierte Fruchtfolgesysteme und Nutzung von Koppelprodukten gemindert werden. Derzeit in Österreich keine signifikante Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion (Gessl, 2013).
Umstellung eines konventionellen Betriebes auf Biolandbau	(+) geringere Emissionen an THG je Hektar und Jahr	(+) größeres Potenzial für mehr Biodiversität, Erhalt und Verbesserung der Bodenfunktionen etc. (–) mögliche Ertragseinbußen gegenüber konventioneller Bewirtschaftung, dadurch eventuell auch je Menge Produkt höhere THG-Emissionen
Wiedervernässung drainagierter Flächen, keine weiteren Drainagierungen von Feuchtflächen	(+) Stopp des Kohlenstoffabbaus in stark humosen Böden (insbes. Moorböden); Beginn einer neuen Sequestrierung	(+) Steigerung der Biodiversität, Schutz und Rückhalt lokaler Wasserressourcen, ausgeglicheneres lokales Temperaturregime
Wiederaufforstung von landwirtschaftlichen Flächen	(+) starker Aufbau des Bodenkohlenstoffpools und des im Holz gebundenen Kohlenstoffes	(–) eventuell Rückgang der Biodiversität (Aufforstung von Dauergrünland), Verlust von Flächen für Nahrungsmittelproduktion, Verlust von lokaltypischer Kulturlandschaft, eventuell negative Auswirkungen auf Tourismus und lokale Wertschöpfungsketten.
Kühlung von Ställen	(–) erhöhter Strombedarf, ev. neutral (0) wenn Strom aus alternativen Energiequellen (z. B. Photovoltaik) oder durch angepasste Stallarchitektur bzw. energiesparende Kühlmethoden (z. B. Sprenkler)	(+) bessere Tiergesundheit, Tierleistung und Futterverwertung

[1] Legende: (+) überwiegend positiv, (0) überwiegend neutral, (–) überwiegend negativ

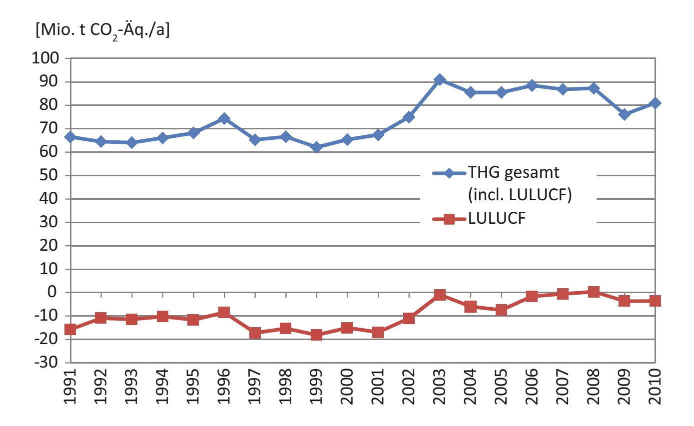


Abbildung 2.4 THG-Emissionen (inklusive landnutzungsbedingte Quellen / Senken) in Österreich insgesamt und THG-Emissionen des Landnutzungssektors (LULUCF). Quelle: National Inventory Report, Anderl et al. (2012)

Figure 2.4 Total Austrian GHG emissions (including sources and sinks from land use, land-use change and forestry, LULUCF) contrasted with LULUCF emissions only. Source: National Inventory Report, Anderl et al. (2012)

nahmen umgesetzt, wobei eine Reihe anderer Entscheidungskriterien auch eine Rolle spielen können, wie z. B. gesetzliche Rahmenbedingungen, Arbeitsbelastung, persönliche Präferenzen etc. (Tabelle 2.2). Dies ergibt eine Vielzahl möglicher Maßnahmen, die in der Landwirtschaft in Bezug zum jeweils konkreten Fall umgesetzt bzw. empfohlen werden könnten. Analysen von Anpassungsoptionen im Bereich der Landwirtschaft mit Berücksichtigung sozio-ökonomischer Wechselwirkungen sind in Abschnitt 2.8 beschrieben.

In Tabelle 2.3 sind die wichtigsten oben diskutierten positiven oder negativen Wechselwirkungen zwischen Anpassungsmaßnahmen, THG-Minderung und anderen Effekten zusammengefasst (ohne sozio-ökonomische Wirkungen).

2.3 Forstwirtschaft
2.3 Forestry

Seit dem Beginn der Waldinventur im Jahr 1961 beträgt die Zunahme der Waldfläche insgesamt 300 000 ha, das entspricht etwa der siebenfachen Fläche von Wien (Russ, 2011; Umweltbundesamt, 2010a). Der Anteil nadelholzdominierter Bestände nahm in den letzten Jahrzehnten zugunsten laubwalddominierter Bestände ab; dennoch bestehen auf Grund von gegenwärtigen bzw. vergangenen wirtschaftlichen Gegebenheiten nach wie vor in vielen Gebieten Nadelwälder auf natürlichen Laubholzstandorten. Der Wald spielt eine wichtige Rolle als Landschaftselement sowie als Schutz- und Bannwald, für Erholung und Tourismus, den Wasserkreislauf und die Erhaltung der Biodiversität. Der Wald bietet einen Lebensraum für zahlreiche Arten, darunter auch Rote-Liste-Arten. Von besonderer Bedeutung für die Biodiversität ist der Bestand an Totholz, der in den letzten Jahren deutlich angestiegen ist (BFW, 2012; Umweltbundesamt, 2010a).

Sowohl THG-Minderung als auch -Anpassung spielen im Wald eine wichtige Rolle. Wald kann einen Beitrag zum Klimaschutz leisten, indem Holz verstärkt an Stelle von nicht-nachhaltigen, emissionsintensiven Rohstoffen für die Herstellung langlebiger Produkte genutzt wird, z. B. im Gebäudebereich. Als Bioenergielieferant kann der Wald einen wichtigen Beitrag zur Verringerung des Fossilenergieeinsatzes leisten, wobei zu beachten ist, dass eine Steigerung des Einschlags die CO_2-Senkenfunktion des Waldes reduzieren kann (vgl. Abschnitt 2.3.3). Verbesserungen im Waldmanagement (z. B. durch Vermeidung großflächigen Einschlags) und richtiges Management von nassen Standorten können ebenfalls zum Klimaschutz beitragen.

Der Wald ist empfindlich gegenüber Klimawandel (vgl. Band 2, Kapitel 3). Dies gilt sowohl im Hinblick auf die Verringerung der Verwundbarkeit gegenüber Schädlingen, Krankheiten oder Auswirkungen von Extremereignissen, wie etwa Sturmschäden.

2.3.1 THG-Minderung in der Forstwirtschaft

Treibhausgas-Emissionstrends

Der Sektor „Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft" war bisher in Österreich in den meisten Jahren eine Senke von Treibhausgasen (Abbildung 2.4), wobei die Senkenfunktion seit 2003 stark zurückgegangen bzw. teilweise nicht mehr vorhanden ist (vgl. Band 1, Kapitel 2). Der Rückgang der Kohlenstoffsenke kann wie folgt erklärt werden: Laut Waldinventur 2007 / 09 stiegen die Erntemengen nach dem Jahr 2002 signifikant an, was die Kohlenstoffsenke im Wald verringerte. Außerdem wurde die Berechnungsmethode verändert: Erstmals wurden die Veränderungen des Bodenkohlenstoffpools (Auflagehumus und Mineralboden) berücksichtigt, wobei der Boden eine leichte Kohlenstoffquelle darstellt.
Die Produktivität des Waldes ist in der Vergangenheit angestiegen. Dies wurde durch mehrere, einander verstärkende Faktoren bewirkt, vor allem durch die Verlängerung der Vegetationsperiode, den Eintrag von Stickstoff und damit die Beseitigung eines Nährstoffmangels. Beispielsweise wird eine Verlängerung der Vegetationszeit schon seit einigen Jahrzehnten beobachtet, sie hat in Mitteleuropa in den vergangenen

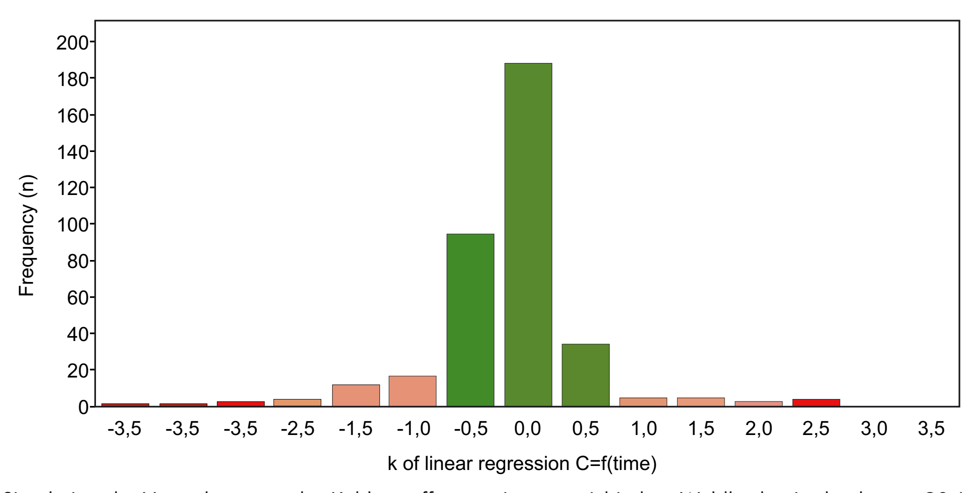


Abbildung 2.5 Simulation der Veränderungen des Kohlenstoffvorrats in österreichischen Waldböden in den letzten 20 Jahren. Die meisten Böden weisen im 20-jährigen Simulationszeitraum keine Veränderung des Bodenkohlenstoffvorrats auf. Die links-schiefe Verteilung deutet darauf hin, dass insgesamt ein gewisser Kohlenstoffverlust stattgefunden hat; das Ergebnis ist statistisch signifikant. Quelle: Jandl et al. (submitted)

Figure 2.5 Simulation of changes in C stocks in Austrian forest soils in the last 20 years. In the 20 year period simulated, most soils do not show a change in soil C stocks. The left-skewed distribution suggests that some C loss may have occured; this result is statistically significant. Source: Jandl et al. (submitted)

40 Jahren um etwa zehn Tage zugenommen (Menzel et al., 2006). Der weitaus größte Effekt ist durch den Stickstoffeintrag gegeben (Smidt et al., 2012; van Oijen und Jandl, 2004). In der Waldinventur 2000 / 02 übertraf der stehende Vorrat im österreichischen Wald erstmals den Wert von einer Mrd. Festmeter (Schadauer und Büchsenmeister, 2004; Büchsenmeister, 2011). Die Netto-Vergrößerung der Waldfläche durch die Aufforstung von landwirtschaftlichen Grenzertragsböden und nicht mehr bewirtschaftetem Grünland, sowie ein unter dem Zuwachs liegender Holzeinschlag, führen zu einem langsamen Aufbau des Holzvorrats und somit zu einer Kohlenstoffsequestrierung. Der Effekt einer Vergrößerung der Waldfläche wirkt sich erst einige Jahre nach der Aufforstung signifikant aus, wenn diese Flächen höhere Altersklassen erreichen und in größerem Ausmaß Kohlenstoff akkumulieren.

Treibhausgasemissionen aus Waldböden

Waldböden sequestrieren Kohlenstoff und neutralisieren dadurch ca. 10 % der Emissionen aus fossilen Brennstoffen (Luyssaert et al., 2010). Sie nehmen größere Mengen von Methan (CH_4) aus der Atmosphäre auf als landwirtschaftliche Böden und emittieren weniger Lachgas (N_2O).

Die Senkenwirkung der Waldböden für CO_2 ist vor allem eine Konsequenz der Vergrößerung der Waldfläche, da der Kohlenstoffpool von Waldböden über dem von landwirtschaftlich genutzten Böden liegt (Jandl, 2011). Betrachtet man die Waldböden, die bereits vor dem Jahr 1990 Waldböden waren („forests remaining forests“), zeigt sich ein leichter Verlust an Bodenkohlenstoff. Der Kohlenstoffverlust wurde einerseits durch Geländeerhebungen und andererseits durch Simulationen mit dem Modell „Yasso07“ (Liski et al., 2009) identifiziert. Die Simulationsergebnisse für einen Zeitraum von 20 Jahren sind in Abbildung 2.5 dargestellt. „k“ stellt den Anstieg der linearen Regressionsfunktion des Bodenkohlenstoffvorrats über den Simulationszeitraum dar. Die hohe Häufigkeit (mehr als 40 %) von Werten bei „k = 0“, zeigt, dass die meisten Waldböden im Versuchszeitraum keine Veränderung des Bodenkohlenstoffvorrats erfahren haben.

Gemessen an der jeweiligen Klimawirksamkeit, d. h. an ihrem „global warming potential“, tragen Emissionen von CH_4 derzeit 18 % und jene von N_2O 6 % zu den globalen anthropogenen Treibhausgasemissionen bei. Man nimmt an, dass diese Emissionen in Zukunft europaweit weiter ansteigen werden. Im ersten Europäischen Stickstoff-Assessment wird europäischen Wäldern ein kühlender Effekt zugeschrieben, das Ausmaß dieses Effekts ist jedoch mit großen Unsicherheiten behaftet (Butterbach-Bahl et al., 2011a,b). In Österreich ist der Emissions-Trend der beiden Gase rückläufig (Anderl et al., 2012).

Managementstrategien, wie der Ersatz von Nadel- durch Laubwaldbestände (Russ, 2011), die Restaurierung von Feuchtgebieten zur Erhaltung der Biodiversität und veränderte oder intensivierte Strategien zur verstärkten kaskadischen Nutzung von Holz werden in Kombination mit dem Klimawandel (z. B. Temperaturanstieg und veränderte Niederschlä-

Abbildung 2.6 Synthese der Effekte und Interaktionen von Waldveränderung auf den Austausch von Treibhausgasen. Pfeile, die von den externen Antriebskräften ausgehen, stellen positive oder negative Wirkungen auf die internen Antriebskräfte dar, die in der Studie zusammengefasst wurden. Ein „+" oder „–" am Ende eines Pfeils zeigt die Art der Wirkung (Anstieg oder Abnahme) des Effekts auf den THG-Austausch, wenn sich die jeweilige interne Antriebskraft verstärkt, sowie Wechselwirkungen zwischen den internen Antriebskräften. Quelle: adaptiert nach Gundersen et al. (2013)

Figure 2.6 Synthesis of the effects and interactions of forest change on GHG exchange. Arrows starting from the external drivers denote those positive or negative impacts on internal drivers comprised in our study. The + or – signs at the arrows starting from an internal driver indicate the observed direction (increase or decrease) of the effect on GHG exchange (or the interaction on another internal driver) when the internal driver in question increases. Source: adapted from Gundersen et al. (2013)

ge) und Luftverunreinigungen die derzeitigen THG-Bilanzen von CH_4 und N_2O für Wälder verändern. Eine Klimaerwärmung verändert die Bodenbedingungen in Wäldern und wirkt damit auf die internen Antriebskräfte ein, was Auswirkungen auf die CH_4- und N_2O-Flüsse haben kann (Abbildung 2.6; Butterbach-Bahl et al., 2011a, b). Auf Basis der aktuellen Literatur weiß man, dass Boden-pH, Diffusionsparameter, Stickstoffverfügbarkeit, Bodentemperatur und Wassergehalt die wichtigsten internen Antriebskräfte für den Austausch von CH_4 und N_2O zwischen Boden und Atmosphäre darstellen (Ball et al., 1997; Butterbach-Bahl et al., 2011a,b; Liu und Greaver, 2009; Machefert et al., 2002).

Systemische Wechselwirkungen zwischen forstlicher Nutzung und globalem Wandel

In europaweiten Manipulationsversuchen in Wäldern wurden die Effekte von Stickstoff-Düngung, Temperaturerhöhung, Niederschlag bzw. Bodenhydrologie, Nutzungsintensität, Holzascheeinbringung, pH-Gradienten und Aufforstung auf Emissionen aus Böden untersucht. Zumeist wurde eine Verschlechterung der THG-Bilanz der Böden festgestellt: Die N_2O-Emissionen aus Waldböden nahmen zu und die CH_4-Aufnahme nahm ab. Es gab aber auch Ausnahmen. So emittierten Altbestände mehr N_2O als Jungbestände, es wurde jedoch auch mehr Methan im Boden abgebaut. Ein anderer Zielkonflikt zeigte sich bei Feuchtegradienten: Auf nassen Standorten nehmen die N_2O-Emissionen zu, bei völliger Überflutung wurden sie hingegen vernachlässigbar klein. In diesem Fall erhöhten sich aber die CH_4-Emissionen beträchtlich (Christiansen et al., 2012; Welti, 2012) (vgl. Band 2, Kapitel 5).

Ähnliche Effekte auf die Gase CH_4 und N_2O sind im Zusammenhang mit den steuernden Antriebskräften (Abbildung 2.6) zu sehen. Ein starker positiver Feedbackeffekt auf N_2O durch die Kombination der Faktoren Stickstoffverfügbarkeit und Bodenwassergehalt ist dokumentiert und tritt besonders nach Kahlschlägen auf. Bei THG-Minderungsmaßnahmen sollte auf Grund des 12-mal stärkeren Erwärmungspotenzials von N_2O im Vergleich zu CH_4 und des Auftretens von hohen N_2O-Emissionsraten das Hauptaugenmerk auf N_2Ov gelegt werden. Jedoch reagieren in den meisten Wäldern N_2O und CH_4 ähnlich auf Manipulationen.

Feuchtgebiete, vor allem aufgeforstete Moore, weisen hohe THG-Emissionsraten aus dem Boden auf (Maljanen et al., 2010) und sind besonders empfindlich gegenüber Veränderungen der Bodenparameter (Klemedtsson et al., 2005); ebenso Wälder mit einer komplexen Topographie (Grunwald et al., 2012). Verstärkter Niederschlag im Winter, wie er für be-

stimmte Regionen vorhergesagt wird, kann zeitweilige Überflutungen verstärken. Wenn diese Überflutungen nicht dauerhaft sind, kommt es unter Umständen zu einer Erhöhung der THG-Emissionen.

Nach Feuchtgebieten führten Veränderungen in der Waldstruktur auf sauren Standorten (pH < 5) mit einem engen C/N Verhältnis (< 25) zu hohen N_2O Emissionen; entsprechendes Forstmanagement kann bei der Verringerung der Emissionen helfen.

Optionen zur Verringerung von THG-Emissionen aus Waldböden

Bei der Verringerung von THG-Emissionen aus Waldböden spielen folgende Aspekte eine wichtige Rolle:

- Management von Wäldern in Feuchtgebieten (z. B. Auwälder, Moore);
- Vermeidung von Kahlschlägen und Förderung von Plenterbewirtschaftung, wo es sinnvoll ist;
- Reduktion der Stickstoffverfügbarkeit;
- Vermeidung von weiterer Bodenversauerung auf gefährdeten Standorten.

Die THG-Emissionen können in stickstoffreichen Wäldern (z. B. im Einzugsbereich von Ballungsgebieten) durch Vermeidung von Kahlschlägen verringert werden. Die erhöhten N_2O-Emissionen nach Holzeinschlag sind vorübergehend und halten nur etwa 3–8 Jahre an (Hackl et al., 2000). Auf stickstoffreichen Standorten könnte allerdings eine verstärkte Biomassenutzung den Stickstoffüberschuss eindämmen und die THG-Emissionen vermindern, wobei zu beachten ist, dass nicht andere Nährstoffe wachstumslimitierend werden. Klemedtsson et al. (2010) schlagen dafür das Ausbringen von Holzasche vor. Auch bei der Bewirtschaftung von Wäldern für Bioenergieproduktion auf stickstoffreichen Standorten kann es passieren, dass andere Nährstoffe zu Mangelfaktoren werden. Nur wenn dies durch geeignetes Management vermieden wird, kann man hohe Zuwachsleistungen erreichen, die eine Voraussetzung dafür darstellen, dass Ersatz von Fossilenergie durch forstliche Biomasse einen Beitrag zum Klimaschutz leistet (Abschnitt 2.8). Richtiges Forstmanagement ist entscheidend, um die Emissionen von CH_4 und N_2O aus Waldböden möglichst niedrig zu halten.

Potenziale zur THG-Reduktion in der Forstwirtschaft

Die Mechanisierung der Forstwirtschaft wurde bereits in den 1970er Jahren weitgehend abgeschlossen. Transportwege sind bei der Vermarktung von Rohholz ein entscheidender Kostenfaktor und werden daher aus ökonomischen Gründen optimiert. Spezifische Untersuchungen zur THG-Reduktion durch effizienteren Einsatz forstlicher Betriebsmittel liegen nicht vor.

Der vielfach geforderte Verzicht auf die Kahlschlagwirtschaft und die Forderung nach kleinflächigen Bewirtschaftungsformen wurde bereits im Forstgesetz (§ 82, BgBl, 1975) verankert. Allerdings kann auch auf Kahlschlägen der derzeit erlaubten Größe (2 ha) nach dem Holzeinschlag ein beträchtlicher Mineralisierungsschub der organischen Substanz im Boden auftreten, was mit hohen CO_2-Emissionen verbunden ist. Die sich auf Kahlschlägen üppig entwickelnde, krautige Vegetation ist dafür ein sichtbares Zeichen. Mineralisierungsschübe können weitgehend unterbunden werden, wenn zum Einschlag von Einzelbäumen übergegangen wird. Diese Nutzungsformen sind allerdings derzeit nicht wirtschaftlich.

Schutz der C-Bestände, Vergrößerung der C-Bestände im Boden und im Baumbestand

Die Kohlenstoffvorräte in den österreichischen Wäldern spielen eine erhebliche Rolle für die österreichische Treibhausgasbilanz (vgl. Band 1). Mit Ausnahme der letzten zehn Jahre nahmen in den vergangenen Jahrzehnten die Kohlenstoffvorräte erheblich zu, obwohl die Nutzung kontinuierlich gesteigert wurde, da die Waldfläche insgesamt wuchs, sich die Altersstruktur (Altersgruppen an Bäumen, z. B. Lücken, 1–20 Jahre, 21–40 Jahre etc., vgl. Hauk und Schadauer, 2009) verschob und die Nutzung des Waldes stets geringer als der Zuwachs war (Gingrich et al., 2007; Erb et al., 2008; Schadauer und Büchsenmeister, 2004). Der Vorratsaufbau findet vor allem im Kleinprivatwald statt, während die Forstbetriebe und die Österreichischen Bundesforste AG den Zuwachs abschöpfen und sogar in manchen Regionen einen Teil des akkumulierten Vorrats abbauen (Büchsenmeister, 2011). Der Holzeinschlag stieg ab der Jahrtausendwende bis etwa 2008 stark an und nahm danach wieder etwas ab (Prem und Beer, 2012).

Ursache für die Zunahme der Waldfläche ist vor allem der seit vielen Jahrzehnten voranschreitende Strukturwandel in der Landwirtschaft (Erb et al., 2008; Krausmann, 2001). Durch die Verringerung der Anzahl landwirtschaftlicher Betriebe und das Aufgeben traditioneller Formen der Bewirtschaftung wird land-

wirtschaftliche Nutzfläche in Wald umgewandelt. Dies geschieht entweder durch Aufforstung mittels Saatgut oder Setzlingen oder durch natürliche Verjüngung/Neubildung, ausgehend von benachbarten Waldflächen. In jedem Fall entsteht daraus nach behördlicher Waldfeststellung ein gemäß Forstgesetz zu bewirtschaftender Wald, wenn auch nicht immer ein Wirtschaftswald. Zumeist wird Ackerland zuerst in Grünland umgewandelt, dann Grünland in Wald. Die direkte Umwandlung von Ackerland in Wald ist selten. In der Hauptsache handelt es sich in Österreich um das Zuwachsen von Almen, also um den Verlust an extensiv genutztem Grünland und um das Aufforsten von landwirtschaftlichen Grenzertragsböden (Erb et al., 2008; Krausmann, 2001; Krausmann et al., 2003; Russ, 2011).

Die Veränderung des Kohlenstoffpools im Boden ergibt sich als Bilanz von zwei gegenläufigen Prozessen. Durch den vermehrten Zuwachs wird der Kohlenstoffinput in den Boden vergrößert, was eine Vergrößerung des Kohlenstoffpools im Boden bewirkt. Auf der anderen Seite wird die Aktivität der Bodenmikroorganismen durch die Erhöhung der Temperatur angeregt, was zu einer Verringerung des Kohlenstoffpools beiträgt. In einem Geländeexperiment mit 139 Bodenprofilen und einem Modellierungsexperiment mit mehr als 300 Standorten wurde festgestellt, dass die Kohlenstoffbilanz der Waldböden leicht negativ ist; der Trend ist signifikant (Jandl et al., submitted).

(Nicht-)Permanenz und Verifizierbarkeit, Sättigung der Senken

Kohlenstoffvorräte sind in der Biomasse (oberirdisch, unterirdisch) sowie in Waldböden gespeichert. Wachsen diese Vorräte, dann wirkt der Wald als Kohlenstoffsenke und trägt damit zur Treibhausgasreduktion bei. Bei forstlichen THG-Reduktionsmaßnahmen können daher Fragen der Permanenz, Sättigung und Verifizierbarkeit der THG-Reduktion auftreten.

Der Begriff „Permanenz“ bezieht sich üblicherweise auf die Frage, wie lange der Kohlenstoff in Kohlenstoffbeständen im Wald gespeichert bleibt bzw. wie groß das Risiko ist, dass er durch natürliche Einflüsse (z. B. Windwurf) oder durch forstliche Maßnahmen (z. B. Kahlschlag) freigesetzt wird (Smith, 2005). Wenn die Kohlenstoffsequestrierung im Wald als Klimaschutzmaßnahme eingesetzt wird, sind Absicherungen gegenüber derartigen Risiken – die bei anderen Maßnahmen zur THG-Reduktion nicht auftreten – nötig. Im Wald ist in der Regel eine langfristige Zunahme des Kohlenstoffbestands bis zu einer Obergrenze („Sättigung“, siehe unten) zu beobachten. Auf Einzelbaum- bzw. Bestandsebene erfolgt nach mehreren Jahrzehnten (in forstwirtschaftlich genutzten Wäldern) bzw. Jahrhunderten (in nicht genutzten Wäldern) eine Schlägerung bzw. ein Absterben der bestandsbildenden Bäume, verbunden mit einer Freisetzung eines Teils des Kohlenstoffvorrats (Körner, 2003, 2009). Die Schwankungen im oberirdischen Kohlenstoffpool sind dabei größer als im Boden, der ein stabilerer Kohlenstoffspeicher ist. Allerdings sind auch hier Mineralisierungsschübe und somit Ausgasungen von CO_2 möglich, etwa nach Hangrutschungen, Kahlschlägen oder Entwässerungen.

Der Begriff „Sättigung“ bezieht sich darauf, dass der Kohlenstoffvorrat im Wald auch langfristig nur bis zu einer gewissen Grenze anwächst (Körner, 2003, 2009), wobei auch alte Bestände unter Umständen beträchtliche Mengen Kohlenstoff binden können (Luyssaert et al., 2008). Während auf Einzelbaum- bzw. Bestandsebene die oben beschriebene „Slow in – fast out“-Dynamik[5] zu beobachten ist (Körner, 2003), stellt sich auf Landschaftsebene ohne menschlichen Einfluss langfristig ein Mosaik aus verschiedenen Sukzessionsstadien ein (Shugart, 1984), bei dem der Kohlenstoffvorrat ein Fließgleichgewicht erreicht und über große Räume und kurzfristige Klimaeinflüsse gemittelt weitgehend konstant bleibt. Nach Erb (2004) und Gingrich et al. (2007) würde der Kohlenstoffbestand auf dem österreichischen Territorium ohne Landnutzung etwa zwei Mrd. Tonnen (2 Gt C; 1 Gt = 1 Mrd. t = 10^9 t = 10^{15} g = 1 Pg) betragen, während er heute bei etwa 1,25 Gt C liegt, wovon ein großer Teil auf den Wald (ober- und unterirdisch) entfällt, der Rest überwiegend auf den Bodenkohlenstoff von Ackerflächen, Grünland und natürlichen Ökosystemen. Der heutige Kohlenstoffvorrat in Böden und Wald ist bedeutend größer (ca. 20 %) als jener im Jahr 1830 (rund 1,04 Gt C). Der Zuwachs geht zu einem großen Teil auf die Zunahme von Waldfläche und Bestandsdichte des Waldes zurück (Erb et al., 2008; Gingrich et al., 2007).

Eine Sättigung der potenziellen Senkenfunktion des österreichischen Waldes ist derzeit bei weitem nicht gegeben. Dies ist anhand der derzeitigen Altersklassenverteilung im Wald (Abbildung 2.7) deutlich erkennbar, die einen deutlichen Überhang der 20–40 und 40–60-jährigen Bestände aufweist (Schadauer, 2012). Dies ergibt sich auch aus dem Strukturwandel in der Landwirtschaft. Unterstellt man eine durchschnittliche Umtriebszeit von etwa 100 Jahren, so werden der durchschnittliche Kohlenstoffvorrat und damit auch die -speicherung in den kommenden Jahrzehnten weiter ansteigen. Nach Berechnungen von Ciais et al. (2008) ist in den europäischen Wäldern noch ein erhebliches Potenzial an Koh-

[5] „Slow in – fast out“ bezieht sich darauf, dass die Bindung von Kohlenstoff durch das Wachstum der Wälder langsam erfolgt, während die Emission von CO_2 in kurzer Zeit während und nach einem Eingriff (z. B. Schlägerung) oder Störung (z. B. Brand, Absterben von Bäumen) erfolgt (Körner, 2003).

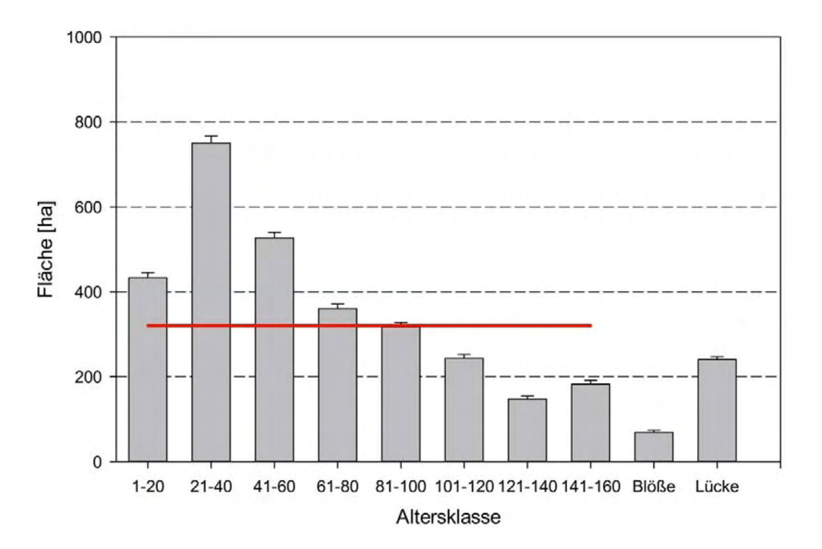


Abbildung 2.7 Altersklassenverteilung im österreichischen Wald. Die rote Linie entspricht dem Normalwaldmodell, bei dem die Waldfläche gleichmäßig auf die Altersklassen verteilt ist. Quelle: Schadauer (2012)

Figure 2.7 Age class distribution in Austrian forests (Source: Schadauer, 2012). The red line represents the regular forest model („Normalwaldmodell"), i. e. an idealized concept of traditional Central European forestry, in which forest area is distributed equally among the stand age classes. Source: Schadauer (2012)

lenstoffsequestrierung bis zu einer Sättigung der Senken vorhanden, wobei der nachhaltig erreichbare Maximalwert der Kohlenstoffspeicherung in Wäldern vom Einschlagsniveau abhängt (Holtsmark, 2012).

Die Waldböden haben derzeit einen relativ hohen Kohlenstoff-Sättigungsgrad, wobei der Kohlenstoffvorrat abnimmt (Jandl et al., submitted), weil der Kohlenstoffgehalt im Boden durch die stattfindende Erwärmung verringert wird. Hingegen bewirkt eine Umwandlung von Ackerland in Wald eine Zunahme des Kohlenstoffvorrats im Boden (Erb et al., 2008; Gingrich et al., 2007).

Zur „Verifizierbarkeit" kann gesagt werden, dass Veränderungen des Vorrats an oberirdischer Biomasse aus dem Datenmaterial der Österreichischen Waldinventur (Büchsenmeister, 2011) mit großer Genauigkeit nachweisbar sind. Die Waldinventur erhebt die Eingangsparameter für die Bestimmung des Stammvolumens; daraus wird durch einen Satz von Biomasse-Expansionsfaktoren der gesamte Biomassevorrat bestimmt. Beim Boden ist die Verifizierbarkeit von Änderungen des Bodenkohlenstoffpools allein auf der Grundlage von Daten aus Geländeerhebungen aufwendig, weil die erhebliche räumliche Variabilität von Bodeneigenschaften einen großen Stichprobenumfang voraussetzen würde. Daher wurden die Pooländerungen mit dem Modell „Yasso07" simuliert. Die Modellierungsergebnisse wiesen denselben zeitlichen Trend des Bodenkohlenstoffpools auf wie die Schätzungen aufgrund der Messwerte.

Potenzial forstlicher Biomasse für die energetische Nutzung in Österreich

In der Holz- und Biomasse-Aufkommensstudie für Österreich (HOBI; Schadauer und Neumann, 2008) wurden die verfügbare oberirdische Holz- und Biomasse, ihre Veränderung über die Zeit und die nachhaltig nutzbaren Mengen bis zum Jahr 2020 abgeschätzt (Lackner, 2009). Aus Nutzungsszenarien, die mit Hilfe von waldbaulich-ertragskundlichen Grundlagen formuliert wurden, wurden theoretische Biomassepotenziale ermittelt. Diese wurden aufgrund standörtlicher, ökonomischer, bringungstechnischer und naturschutzrechtlicher Einschränkungen verringert, um ein verfügbares Nutzungspotenzial abzuleiten. Standörtliche Nutzungseinschränkungen betreffen den mit der Biomasseentnahme verbundenen Nährstoffentzug und bestimmen dadurch das bei einer nachhaltigen Nährelementversorgung mögliche Nutzungsverfahren. Ökonomische Aspekte, wie Holzerntekosten und erzielbare Erlöse aus dem Holzverkauf, wurden durch Ausformung in handelsübliche Sortimente, verschiedene Ernte- und Bringungstechnologien und Preisszenarien berücksichtigt. Nutzungseinschränkungen infolge von Naturschutzzielen fanden anhand räumlicher Abgrenzung von Gebieten mit Naturschutzauflagen Eingang in die Berechnung des verfügbaren Potenzials. Nach dem Abzug von empfindlichen Standorten stehen in Österreich jährlich zwischen 30 und 40 Mio. m^3 Holz zur Verfügung. Etwa ein Drittel des Vorrats kann aufgrund von ökonomischen oder standortskundlichen Restriktionen nicht genutzt werden. Eine verstärkte Mobilisierung des Vorrats könnte größere Holzmengen für die stoffliche und energetische Nutzung liefern. Außerdem könnte die waldbauliche Behandlung weiter optimiert werden.

In allen Fällen wäre allerdings eine Erhöhung des Holzpreises erforderlich, da der Markt sonst von der großen Gruppe der Kleinwaldbesitzer auf Grund der niedrigen Preise kaum bedient wird (Mannsberger, 2009). Bei der Bewertung der THG-Reduktion durch einen verstärkten Einsatz forstlicher Biomasse für die stoffliche und energetische Nutzung sind systemische Effekte zu beachten (Abschnitt 2.3.3).

2.3.2 Anpassungsmaßnahmen in der Forstwirtschaft

Der Klimawandel bringt für die österreichische Forstwirtschaft regional unterschiedliche Herausforderungen mit sich. In Regionen, in denen die Produktivität der Wälder derzeit durch die Vegetationsperiode begrenzt wird, sind durch den Klimawandel auch Verbesserungen möglich. Dies gilt für weite Teile des Bergwaldes sowie für Flächen, die oberhalb der aktuellen Waldgrenze gelegen sind. Bereits bekannte Problemgebiete, wie der sommerwarme Osten und der Nordosten Österreichs, werden in Zukunft noch schwieriger zu bewirtschaften sein, da der Wald in diesen Regionen bereits an der Verbreitungsgrenze der Steppe gelegen ist. Hier ist der Wasserhaushalt der bestimmende Faktor (vgl. Band 2, Kapitel 2 und Kapitel 3).

Problemwahrnehmung der forstwirtschaftlichen Betriebe

Die Relevanz des Klimawandels für die Forstwirtschaft wird von den österreichischen Forstbetrieben bereits deutlich wahrgenommen (Maierhofer, 2009). Mehr als die Hälfte der befragten BetriebsleiterInnen und VertreterInnen der Verwaltung sehen auch Vorteile durch den Klimawandel. Die größten Schäden verursachten seit dem Jahr 1990 die Faktoren Windwurf und Borkenkäfer, deren Zusammenhänge mit dem Klimawandel komplex sind. Mehr als 85 % der BetriebsleiterInnen von größeren Forstbetrieben geben an, bereits Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel umgesetzt zu haben, während KleinwaldbesitzerInnen deutlich weniger reagiert haben. Die Anpassungsmaßnahmen umfassen Baumartenwahl (Toleranz der aktuellen Baumarten in Bezug auf den Klimawandel), Umgang mit Schäden und Kalamitäten (eingetroffene oder erwartete) und die waldbauliche Flexibilität (Kombination aus Langfristigkeit der Bewirtschaftungsstrategie und Eignung der Baumartenmischung). KleinwaldbesitzerInnen werden in Zukunft verstärkt mit Beratung und Anreizen in Form von Förderungen betreut (Maierhofer, 2009).

Als Rahmen für Anpassungsmaßnahmen in der Forstwirtschaft bieten sich unterschiedliche Ebenen an. Lindner et al. (2010) nennen (a) die Bestandsebene, (b) die Ebene des Forstbetriebs und (c) die Ebene von Politik und Verwaltung. Maßnahmen auf der Bestandsebene umfassen alle klassischen waldbaulichen Maßnahmen von der Baumartenwahl bis zu Durchforstungskonzepten und Verjüngungsverfahren. Auf der Ebene des Forstbetriebs sind Maßnahmen möglich im Bereich von Forstschutzkonzepten sowie von verbesserten Planungsmethoden, die Unsicherheit besser berücksichtigen. Auf der Ebene der Politik sind z. B. vermehrte Forschungsanstrengungen und Weiterbildung sowie die Förderung von vorausschauenden Logistikkonzepten zur Bewältigung von Kalamitäten möglich.

In Regionen mit sekundären Fichtenwäldern, insbesondere in der submontanen Höhenstufe, werden Probleme erwartet. Dort sind bereits jetzt die Wachstumsleistungen der Fichten sehr hoch. Allerdings wird durch die bedingte Standorttauglichkeit der Fichte nicht immer das angestrebte Umtriebsalter erreicht (Gschwantner und Prskawetz, 2005; Lexer et al., 2001). Besonders anfällig sind die Fichten für Trockenperioden und Sturmschäden. Die auftretenden Probleme sind seit langem bekannt (Assmann, 1961) und erlangen im Zuge der Diskussion um die Konsequenzen des Klimawandels zusätzliche Relevanz. Eine besonders betroffene Großregion ist das Nördliche Alpenvorland, in dem derzeit besonders produktive Fichtenbestände anzutreffen sind.

Seitens der Forstpraxis wird vielerorts auf die Herausforderungen durch den Klimawandel reagiert. Für mehrere Regionen wurden waldbauliche Handlungsempfehlungen herausgege-

Tabelle 2.4 Beispiele für Waldbau-Empfehlungen in Österreich
Table 2.4 Examples for forestry guidelines in Austria

Region	Auftraggeber / Herausgeber	Quelle
Oberösterreich / Mühlviertel	Land Oberösterreich	Jasser und Diwald, 2011
Vorarlberg	Land Vorarlberg	Amann et al., 2010
Dobrowa / Kärnten	Land Kärnten	Lexer et al., 2005
Bundesgebiet	Österreichische Bundesforste AG	Weinfurter, 2004
Ertragswald der Österr. Bundesforste AG	Österreichische Bundesforste AG	Seidl et al., 2011a

ben (Jandl und Schüler, 2012; Tabelle 2.4). Die Texte enthalten unterschiedlich detaillierte Beschreibungen der Waldgesellschaften und Empfehlungen für deren Bewirtschaftung. Aspekte des Klimawandels sind mehr oder weniger explizit in die Überlegungen subsumiert (z. B. Jasser und Diwald, 2011; Amann et al., 2010; Weinfurter, 2004; Lexer et al., 2005).

Die Empfehlungen unterscheiden sich je nach Region erheblich und können hier nur summarisch diskutiert werden. Vorliegende Studien kommen übereinstimmend zum Schluss, dass durch Mischbestände (verschiedene Baumarten) und durch die Strukturierung der Wälder (Altersklassenverteilung; Bestandsdichte) das Risiko, das vom Klimawandel ausgeht, verringert werden kann. Dennoch bleibt ein beträchtliches Produktionsrisiko, da sich die Standortbedingungen entscheidend verändern werden. Besonders die Verbreitung der Fichte ist unter den zu erwartenden Klimaänderungen nicht in diesem Umfang aufrechthaltbar (Brang et al., 2013; Jandl et al., 2013; Seidl et al., 2009; Zimmermann et al., 2013).

Möglicher zukünftiger Stellenwert nichtheimischer Baumarten (Neobiota), vor allem Douglasie

In vielen Waldbau-Leitfäden wird die potenzielle natürliche Waldgesellschaft (Tüxen, 1956) als „stabiler" Zielwald propagiert. Diese Waldtypen sind aber an das Klima der Vergangenheit angepasst und unter den gegenwärtig veränderten Klimabedingungen nicht mehr generell als waldbauliches Ideal geeignet (Lexer, 2012). Als Vertreter einer nicht-heimischen Baumart, welche für Österreich relevant werden könnte, gilt die Douglasie, die aus dem pazifischen Nordwesten der USA stammt. Hauptverbreitungsgebiete befinden sich im Luv und Lee des küstennahen Kaskadengebirges, sodass eine beträchtliche genetische Auffächerung besteht. Rund 35 % der stark risikoanfälligen Fichtenbestände stocken auf potenziell für die Douglasie geeigneten Standorten (Maroschek und Lexer, 2010). Insbesondere im sommerwarmen Osten besteht das Problem, dass keine wirtschaftlich relevante heimische Baumart unter den in Zukunft erwartbaren Bedingungen gut geeignet erscheint. Beispiele aus Deutschland lassen erwarten, dass die Douglasie auf den Standorten im sommerwarmen Osten gut geeignet wäre, um produktive Bestände zu etablieren. In einer für Europa durchgeführten Studie kommen Hanewinkel et al. (2012) zum Schluss, dass beträchtliche Ertragseinbußen zu erwarten sind, wenn man in Zukunft die von Nischenmodellen prognostizierten zukünftigen Verbreitungsgebiete der heimischen Baumarten unterstellt. Der Einsatz der Douglasie wird kontrovers diskutiert. Seitens des Naturschutzes gibt es Bedenken, dass nicht-heimische Baumarten zwar anfangs erfolgreich seien, später aber zu Problemen führen können (Reif et al., 2011).

Herkunftswahl und Züchtung bzw. Auswahl klimaresistenterer Herkünfte

Die genetische Variationsbreite der Baumarten ist aufgrund ihrer Fähigkeit, mit Klimaveränderungen umzugehen, von großer Bedeutung. Daher ist die Wahl des bestgeeigneten Saatgutes für die Verringerung von negativen Effekten des Klimawandels wichtig. In einer Studie zur Variabilität von österreichischen Fichten-Herkünften, d. h. Genotypen (Kapeller et al., 2012) wurden kaum Einbußen im Höhenwachstum der Fichte beobachtet – im Gegenteil, die zugrundeliegenden Klimaszenarien lassen bis 2080 deutliche Wachstumssteigerungen erwarten. Durch die Wahl von geeignetem Saatgut könnte theoretisch die Produktivität weiter gesteigert werden. In vielen Fällen kann dieses theoretische Potential jedoch wegen zu hohem Schädlingsdruck nicht realisiert werden (z. B. Borkenkäfer). Weiters wird die Auswahl geeigneter Herkünfte auch aufgrund molekulargenetischer Analysen möglich werden, was gezielte Züchtungen zur Anpassungen an ein zukünftiges Klima erlauben sollte.

Bei allfälligen Empfehlungen für einen Baumartenwechsel in einer bestimmten Region ist zu beachten, dass für eine erfolgreiche Implementierung der Empfehlung ausreichend Saatgut genetisch geeigneter Herkünfte nötig ist. Bei einem Waldumbauprojekt kann nur in Ausnahmefällen auf die natürliche Verjüngung gesetzt werden, da diese voraussetzt, dass die gewünschten Baumarten im Vorbestand in ausreichender Menge und genetischer Qualität vorkommen. Geht man davon aus, dass die bedingt standorttauglichen, sekundären Nadelwälder in stabilere Laub-, und Laub-Mischwälder umgebaut werden sollen, so kann aus dem bestehenden Bestand nicht mit einer geeigneten Verjüngung gerechnet werden. Auch die gezielte Verwendung von Überhältern[6] ist nicht immer sinnvoll. Einzelne Reliktbäume sind oft genetisch verarmt und sind nicht als Basis für eine neue Baumgeneration geeignet. Ein Baumartenwechsel ist für Forstbetriebe nur dann vertretbar, wenn er wirtschaftlich rentabel ist. Derzeit ist seitens der Betriebe nicht generell die Überzeugung vorhanden, dass es realistische Alternativen zur Fichtenbewirtschaftung gibt. Angesichts des geringeren Holzzuwachses von Laubwäldern im Vergleich zu Fichtenwäldern sind in wirtschaftlicher Hinsicht Waldbaukonzepte sinnvoll, bei denen der höhere Wert

[6] Unter Überhältern versteht man Altbäume, die bei Schlägerungen stehen bleiben.

der Sortimente den geringeren Holzzuwachs ausgleichen kann. Solange solche Konzepte nicht überzeugend dargestellt werden, erscheint eine Umstellung der Forstwirtschaft im großen Maßstab wenig wahrscheinlich (Brang et al., 2013; Jandl und Schüler, 2012; Ramskogler und Hartleitner, 2012).

Um rechtzeitig auf das Auftreten von neuartigen oder in ihrer Intensität veränderten Schäden reagieren zu können, ist es für die Waldbewirtschaftung wichtig, auf Monitoring-Programme für Schadinsekten zurückgreifen zu können. Risikobeurteilung und Simulationsmodelle können in forstliche Planungssysteme integriert werden (Moore und Allard 2008; Netherer und Schopf, 2010). Geeignete Erschließung der Waldbestände ermöglicht eine rasche Erreichbarkeit und somit die umgehende Einleitung von Kontrollmaßnahmen bei Schadauftreten. Eine wichtige Voraussetzung dafür ist, Wissenslücken in Bezug auf als wichtig identifizierte Schädlinge möglichst zu schließen. Information der forstlichen Praxis über potentiell invasive Arten ist neben den erwähnten Monitoring-Programmen eine wichtige Voraussetzung, um allfällige Einschleppungen rasch zu entdecken und darauf reagieren zu können.

Das in den letzten Jahrzehnten in Österreich beobachtete Borkenkäfer-Massenauftreten nach Sturmschäden zeigte einige Probleme im Schädlingsmanagement auf, die zu einem starken Wachstum der Käferpopulationen führten (vgl. Band 2, Kapitel 3). Anfangs war oft ein verspätetes und inkonsequentes Vorgehen bei der Räumung betroffener Flächen festzustellen. Logistische Probleme traten bei der Aufarbeitung bzw. beim Transport von Schadholz auf; Zwischenlager waren oftmals ungeeignet. Eine unzureichende Erschließung vieler betroffener Flächen erschwerte das rechtzeitige Eingreifen zusätzlich (Krehan et al., 2006; Krehan und Steyrer, 2007). Die Erfahrung zeigte, dass gezielte und zügig angegangene Maßnahmen nach Sturmereignissen die Massenvermehrung von Borkenkäfern eindämmen oder im Idealfall sogar verhindern können (Krehan et al., 2010). Unter der Annahme, dass Borkenkäfer-Massenvermehrungen in größerer Seehöhe wahrscheinlicher werden, gelten gute Erschließung und vorbereitete Notfallpläne besonders in Berggebieten als wichtige Anpassungsmaßnahmen. Unzureichende Kenntnis der Biologie und besonders der Phänologie von Borkenkäfern bei ForstpraktikerInnen wurde als zusätzliches Hindernis bei der Bekämpfung gesehen (Krehan et al., 2006). Hier ist steter Wissenstransfer zur Praxis gefordert, darüber hinaus können Simulationsmodelle zur Prognose der Phänologie (Baier et al., 2007) ebenfalls sehr wertvolle Hilfsmittel bei der Kontrolle der Borkenkäferpopulationen sein.

Beim Anbau nicht autochthoner Baumarten ist mit dem Auftreten neuer Schädlingsarten oder dem Überwechseln heimischer Schädlinge auf diese Baumarten zu rechnen. Mit der Douglasie wurden nur wenige Schadinsekten aus Nordamerika nach Europa importiert, jedoch wird sie von bekannten europäischen Arten befallen. Einige nadelfressende Schmetterlingsraupen (Battisti et al., 2005; Blaschke et al., 2008) sowie einige Borkenkäferarten haben diese Baumart als Wirt akzeptiert. Von letzteren ist besonders nach längeren Trockenphasen schädliches Auftreten dokumentiert (Immler et al., 2006; Völkl, 2008; Blaschke et al., 2008).

Langfristige Vorsorge gegenüber Trockenstress

Eine Herausforderung für das Forstmanagement stellen eher junge Bestände dar, da Zweifel bestehen, ob sie bis zum Ende der geplanten Umtriebszeit dem sich abzeichnenden Klimawandel gewachsen sein werden. Auf der Münchner Schotterebene werden in einem Feldversuch derzeit bedingt standorttaugliche Fichtenbestände unterschiedlich stark durchforstet (Gebhardt et al., 2012). Die Hypothese, die getestet werden soll, ist, dass bei einer zunehmenden Gefährdung durch Trockenstress die Bestände stabiler gemacht werden können, wenn die Bestandsdichte verringert wird. Durch die bekannte Steigerung der Wertleistung bei Durchforstungen wird erwartet, dass die Eingriffe zu keiner drastischen Abnahme des erzielbaren Ertrags führen. Der mehrjährige Versuch ist allerdings noch in der Anfangsphase.

2.3.3 Systemische Effekte, Wechselwirkungen von Anpassung und THG-Minderung

Naturnahe Forstwirtschaft als Anpassungsmaßnahme

In der naturnahen Forstwirtschaft gilt die dauerhafte Bestockung der Fläche als Leitbild, die aus ökologischen Gründen ein anerkanntes Ziel darstellt (Pommerening und Murphy, 2004). Eine Herausforderung besteht in Pflege und Nutzung der Bestände. Die Holzernte ist bei Vorliegen einer räumlichen Ordnung besonders effizient möglich. Nicht zuletzt deshalb wurde der klassische Altersklassenwald zum Leitbild. Für naturnah strukturierte Wälder müssten teurere Formen der Holzernte gewählt werden. Die Herausforderung besteht in der Entwicklung von Nutzungskonzepten, die wirtschaftlich darstellbar sind. Naturnahe Dauerwälder enthalten viele unterschiedliche Bestandsstrukturen und sind daher im Sinne eines Versicherungskonzepts für viele Risiken der Waldbewirtschaftung gut gerüstet (Brang et al., 2008; Lexer, 2012).

Artenreiche Wälder werden ebenfalls regelmäßig empfohlen. Eine Herausforderung besteht darin, die richtigen Mischbaumarten zu wählen. Die potentielle natürliche Vegetation, die lange Zeit als Referenz für die Zielbestockung gegolten hat, verliert in Zukunft an Bedeutung, wenn durch den Klimawandel die Standortbedingungen so verändert werden, dass ein Baumartenwechsel nötig ist.

Eine vielversprechende Möglichkeit ist die gezielte Förderung der Naturverjüngung. Dabei können etwa Baumarten eine Rolle spielen, die derzeit als wenig relevant erachtet werden, aber im Zuge des Klimawandels in der jeweiligen Waldgesellschaft an Bedeutung gewinnen können. Durch diese Maßnahme wird der waldbauliche Spielraum für die Zukunft vergrößert. Die Maßnahme weist den Vorteil auf, dass sie die lokale Expertise der AkteurInnen gut ausnützt (Brang et al., 2013).

Systemische Feedbacks beeinflussen die THG-Reduktion durch forstliche Biomasse

Die energetische Nutzung forstlicher Biomasse ist nur eine von vielen Möglichkeiten der Nutzung von Holz und nur eine der vielfältigen Leistungen des Waldes für die Gesellschaft. Die Forstwirtschaft kann auf verschiedene Weise einen Beitrag zur THG-Reduktion leisten, nämlich durch:

- den Ersatz von Fossilenergie durch biogene erneuerbare Energie (Böttcher et al., 2012; Hasenauer, 2012; Holtsmark, 2012);
- die Speicherung von Kohlenstoff in Waldökosystemen durch Wachstum und Bindung in den Kohlenstoffpools (Luyssaert et al., 2008; Körner, 2009);
- die Speicherung von Kohlenstoff in Holzprodukten, z. B. die Langzeitspeicherung im Holzbau (Eriksson et al., 2012; Gustavsson und Sathre, 2011; Lauk et al., 2012);
- den Ersatz von Materialien und Produkten wie Beton oder Stahl, bei deren Herstellung hohe THG-Emissionen durch Fossilenergie entstehen, durch Holz (materielle Substitution; Eriksson et al., 2012; Gustavsson und Sathre, 2011; Werner et al., 2010).

Eine Optimierung dieser Funktionen ist komplex, sowohl wegen wirtschaftlicher Rahmenbedingungen als auch wegen der Komplexität der Waldökosysteme. Dies ergibt sich aus den im Vergleich zu den jährlichen CO_2-Flüssen (Zuwachs und Abbau von Biomasse) sehr großen Kohlenstoffbeständen (Körner, 2003, 2009), der Langlebigkeit von Bäumen und der daraus resultierenden langfristigen Ursache-Wirkungs-Beziehungen in Wäldern: vergangene Eingriffe wirken jahrzehnte- oder sogar jahrhundertelang nach (Houghton und Goodale, 2004; Erb et al., 2013). Zwischen den oben genannten. Optionen gibt es viele Wechselwirkungen. Eine Steigerung des Holzeinschlags – im Vergleich zu einem Szenario mit geringerem Einschlag – bewirkt eine Verkleinerung der jährlichen Kohlenstoffsenke (nicht unbedingt des Kohlenstoffvorrats; vgl. Böttcher et al., 2012; Holtsmark, 2012). Eine permanente Erhöhung des jährlichen Einschlags gegenüber einem Szenario mit gleichbleibend niedrigerer Nutzung führt langfristig zu einem niedrigeren Gleichgewichts-Kohlenstoffbestand (Holtsmark, 2012; Hudiburg et al., 2011). Auch bei der materiellen Nutzung von Holz, etwa im Bausektor, ist die Verringerung des Kohlenstoffbestands im Wald im Vergleich zu einem Szenario mit niedrigerem Einschlag bei der Bewertung der THG-Bilanz zu berücksichtigen (Eriksson et al., 2012; Gustavsson und Sathre, 2011; Werner et al., 2010).

Wesentlich ist die Dauer der Betrachtungsperiode. Holzeinschlag setzt Kohlenstoff in die Atmosphäre frei, der erst nach Jahrzehnten durch das Wachstum neuer Bäume wieder absorbiert wird. In diesem Zeitraum trägt das CO_2 in der Atmosphäre zur globalen Erwärmung bei; CO_2-Neutralität und Klimaneutralität treten erst nach langer Zeit ein (Cherubini et al., 2011; Malmsheimer et al., 2011). Auch bei einer langfristigen Betrachtung ist die „Kohlenstoffschuld" zu berücksichtigen, die durch die Verringerung der Kohlenstoffspeicherung im Wald durch ein permanent höheres Ernteniveau bewirkt wird und sich erst nach vielen Jahrzehnten durch die eingesparten Emissionen aus Fossilenergie „amortisiert" (Holtsmark, 2012; Hudiburg et al., 2011).

Energetische Nutzung von forstlicher Biomasse kann bei einem Einschlagsniveau, das unter den jährlichen Zuwächsen liegt, und bei einem Nutzungsmodell, bei dem Stammholzeinschlag zur stofflichen Nutzung im Vordergrund steht und vorwiegend Nebenprodukte, Abfälle und Schwachholz energetisch verwertet werden, zum Klimaschutz beitragen. Dies ist in Österreich weitgehend der Fall (Hasenauer, 2012; Nemesthothy, 2013). Würde hingegen der Holzeinschlag zum Zweck der energetischen Nutzung stark ausgeweitet, so würde die so gewonnene forstliche Biomasse in vielen Fällen nicht zum Klimaschutz beitragen (Bird et al., 2012; Bright et al., 2012; Haberl et al., 2013; Schulze et al., 2012).

Andererseits ist für die Forstwirtschaft eine Ausweitung der Holznutzung attraktiv, weil sie eine Vergrößerung ihres Absatzes bewirkt. Eine Erhöhung des Kohlenstoffvorrats durch Reduktion des Holzeinschlags verkleinert hingegen den Absatz ihrer Produkte und ist wirtschaftlich kaum attraktiv – zumindest ohne entsprechende Anreize, etwa in Form von Zah-

lungen für Kohlenstoffspeicherung. Dazu kommen weitere Nachteile einer Verringerung des Holzeinschlags wie etwa eine größere Vulnerabilität gegenüber Schadereignissen. Geringe Bewirtschaftungsintensität führt zur Häufung von Schadereignissen, da die Bestände zu dicht und daher schadensgefährdet werden (Seidl et al., 2011b). Die Nicht-Aufarbeitung von Schadholz bietet Schadinsekten die Möglichkeit zu Massenvermehrungen. Durch die Vermarktung von Schwachholz können die erforderlichen Wald-Pflegemaßnahmen mitunter kostendeckend durchgeführt werden. Einer Maximierung des Kohlenstoffvorrats, die über wenige Jahrzehnte erreicht werden kann, steht langfristig eine größere Instabilität der Wälder durch verstärkte Schadereignisse gegenüber, die einen Teil des sequestrierten Kohlenstoffs wieder freisetzen (Taverna, 2007). Zudem kann die energetische Nutzung von forstlicher Biomasse zu regionalwirtschaftlichen Zielen, wie etwa der Erhöhung der Wertschöpfung, der Schaffung von Arbeitsplätzen in strukturschwachen Gebieten und der Verringerung der Abhängigkeit von Fossilenergieimporten, beitragen.

Baumbestände wachsen in den ersten Jahrzehnten am schnellsten, danach nimmt das Wachstum ab (Hasenauer, 2012). Aus Sicht einer Maximierung der Holzproduktion ist der beste Zeitpunkt zum Einschlag gekommen, wenn der aktuelle Zuwachs gleich dem durchschnittlichen Zuwachs ist, was bei relativ jungen Wäldern (in Österreich nach etwa 60–70 Jahren) der Fall ist. Aus forstwirtschaftlicher Sicht ist eine längere Umtriebszeit vertretbar, wenn ein größerer durchschnittlicher Durchmesser der Stämme erzielt werden soll und aus diesem Grund der Wertzuwachs größer ist, auch wenn der Biomassezuwachs abnimmt. Hierbei ist allerdings das steigende Risiko von Schadereignissen zu beachten. Derartige Optimierungsüberlegungen spielen für das Forstmanagement eine wesentliche Rolle, etwa im Hinblick auf Durchforstungen, die Schwachholz produzieren, die Schadanfälligkeit des Bestands verringern und den Zuwachs höherwertiger Stämme fördern. Überlegungen zur Kohlenstoffsequestrierung im Wald sind den wirtschaftlichen Interessen der Forstwirtschaft gegenüberzustellen, wenn sozial, ökonomisch und ökologisch vertretbare Lösungen gefunden werden sollen.

Das Risiko einer Nährstoffverarmung von Waldböden durch Biomasseentnahme ist bekannt. In jahrzehntelanger Forschung wurden die Folgen der historischen Streunutzung auf die Wälder untersucht. Früher wurden artenreiche Mischwälder durch den Nährstoffentzug infolge einer Entnahme von besonders nährstoffreichen Pflanzenteilen wie Blättern und Zweigen degradiert. Die Erholung dieser Wälder ist noch immer im Gange (Erb et al., 2013). Für die energetische Nutzung von forstlicher Biomasse wird nährstoffreiches Schwachholz (mit einem hohen Anteil von Ästen und Nadeln) verwendet, was potenziell die Standortqualität gefährden kann. Die hierfür besonders empfindlichen Regionen in Österreich sind geographisch abgrenzbar. Bei Überlegungen zum potentiellen Angebot an forstlicher Biomasse wurden diese Standorte exkludiert (Englisch und Reiter, 2009).

Aktuelle Studien zum Einsatz von Holz als Konstruktionselement in Gebäuden zeigen über einen Zeitraum von 100 Jahren in Bezug auf die THG-Bilanz Vorteile von Holzkonstruktionen gegenüber Stahlbetonkonstruktionen. Dabei wurden sowohl die Kohlenstoffbestände und -flüsse im Wald als auch die THG-Emissionen von Errichtung, Nutzung und Entsorgung der Gebäude über ihren Lebenszyklus berücksichtigt. Eine wichtige Rolle spielt dabei der Ersatz von energie- und rohstoffintensiven Materialien wie Stahl und Beton durch den weniger ressourcenintensiven Rohstoff Holz (Eriksson et al., 2012; Gustavsson und Sathre, 2011; Werner et al., 2010).

Die besten Resultate im Hinblick auf die THG-Bilanz bringt eine integrierte Optimierung der Forstwirtschaft, inklusive Forstmanagement, Nutzung von Holz für langlebige Produkte, vor allem im Gebäudebereich, und Nutzung von Nebenprodukten, wie Schwachholz und Abfällen aus Produktion bzw. Produkten am Ende ihrer Lebenszeit für die energetischen Nutzung (Taverna et al., 2007; Werner et al., 2010). Dies weist darauf hin, dass eine kaskadische Nutzung von Biomasse (Haberl und Geissler, 2000; Haberl et al., 2003) in der Forstwirtschaft in vielen Fällen eine ökologisch effektivere Nutzungsstrategie darstellt als die einseitige Maximierung der Energieproduktion von Wäldern, wobei je nach Standort, Baumart, wirtschaftlichen Gegebenheiten, etc. die Nutzung von Schwachholz als Brennstoff sinnvoll sein kann. In Österreich ist das derzeit weitgehend der Fall (Hasenauer, 2012; Nemesthothy, 2013). Ökonomisch wäre eine Ausweitung des Holzeinschlags für die energetische Nutzung kaum sinnvoll, weil hierbei das Stammholz weit unter Wert genutzt würde.

Eine Intensivierung der Holzproduktion hat Auswirkungen auf die Ökosystemleistungen: Veränderungen in der Baumartenzusammensetzung beeinflussen die Biodiversität und möglicherweise die Schutzwirkung vor Naturgefahren, Änderungen der Produktivität die Kohlenstoffsequestrierung und das ökonomische Umfeld des Sektors; alle derartigen Maßnahmen können auch das Landschaftsbild ändern.

2.4 Wasserwirtschaft und Gewässerschutz
2.4 Water management and protection of waters

Die Ausgangssituation der österreichischen Wasserwirtschaft beruht auf den topografischen und geografischen Gegebenheiten des Landes, die ein Mosaik an verschiedenen Einzugsgebieten und Gewässerökosystemen ergeben. Neben der räumlichen Variabilität unterliegt die Ressource Wasser auch zeitlichen Veränderungen.

Die Gewässer Österreichs unterliegen vielfältigen Nutzungen und anderen menschlichen Einflüssen, die Auswirkungen auf die Qualität und Quantität des Wassers haben. Zu den Zielen der Wasserwirtschaft gehört es, einen guten ökologischen und chemischen Zustand der Oberflächengewässer sowie einen guten chemischen und mengenmäßigen Zustand des Grundwassers zu erhalten oder zu erreichen und eine Verschlechterung zu verhindern. Nicht nur die Nutzung der Gewässer sondern auch die Nutzung des Umlandes haben Auswirkungen auf den qualitativen Zustand.

Die Aufgaben der Wasserwirtschaft und des Gewässerschutzes sind der Schutz des Wassers, der Schutz vor dem Wasser und die Nutzung des Wassers. Um den verschiedenen Ansprüchen der einzelnen Bereiche gerecht zu werden, wird – vor allem angesichts der Herausforderung des Klimawandels – eine integrative, interdisziplinäre und robuste Wasserwirtschaft angestrebt.

In der Wasserwirtschaft und im Gewässerschutz selbst gibt es nur wenige THG-Minderungsmöglichkeiten (vgl. Abschnitt 2.4.1), während es vielfältige Adaptionsmöglichkeiten in Bezug auf qualitative und quantitative Änderungen des Klimas gibt (vgl. Abschnitt 2.4.2). In einigen Bereichen sind Adaptionsmaßnahmen schon heute Teil der Wasserwirtschaft, die mit einer hohen natürlichen Variabilität und einer großen Schwankungsbreite hydrologischer Variablen zurechtkommen muss.

2.4.1 THG-Minderung im Bereich der Wasserwirtschaft

Die Möglichkeiten zur THG-Reduktion durch Wasserkraft in Österreich werden im AAR14 in Band 3, Kapitel 3 (Energie und Verkehr) behandelt. Ein weiterer Ausbau der Wasserkraft kann ökologische und flussmorphologische Auswirkungen, wie zum Beispiel eine Beeinträchtigung der Gewässerstrukturen und der Habitatqualität oder einen negativen Einfluss auf die Fischpassierbarkeit und Feststoffdurchgängigkeit haben. Derartige Auswirkungen sind nach den Vorgaben der EU-WRRL (Verschlechterungsverbot bzw. Verbesserungsgebot) und des Nationalen Gewässerbewirtschaftungsplans hintanzuhalten (Habersack et al., 2012). Eine integrative, österreichweite Strategie kann dazu beitragen, energiewirtschaftliche, ökologische und gesellschaftliche Zielsetzungen gemeinsam zu erreichen (Habersack et al., 2011a).

Treibhausgas-Emissionen aus Staubecken

Die Wasserkraft ist THG-arm aber nicht THG-neutral (Barros et al., 2011; DelSontro et al., 2010; Eugster et al., 2011; Guérin et al., 2006; St. Louis et al., 2000; Wehrli, 2011; Tremblay et al., 2004). Bei Messungen an verschiedenen Staubecken, die der Wasserkraftgewinnung dienen, sowohl in den gemäßigten als auch in den tropischen Zonen, wurden THG-Emissionen im Bereich von 220–4 460 mg/m^2/Tag CO_2 bzw. 3–1 140 mg/m^2/Tag CH_4 gemessen (St. Louis et al., 2000). Die Emissionen gehen auf den Abbau organischer Substanzen zurück, die vor dem Einstau im Staubereich vorhanden waren (z. B. im Boden, Pflanzenreste) oder in diesen eingetragen werden (z. B. organische Schwebstoffe).

Faktoren, die die Emissionsmengen aus dem Stauraum beeinflussen, sind das Alter des Stauraums, dessen Standort (Breitengrad, Seehöhe, etc.), die Wassertemperatur und der zur Verfügung stehende Gehalt an organischen Stoffen (z. B. durch Eutrophierung) sowie deren Abbaubaubarkeit (Barros et al., 2011; DelSontro et al., 2010; St. Louis et al., 2000). Ebenfalls von Bedeutung sind die Druckänderung durch die Atmosphäre und Schwankungen des Wasserstandes (Eugster et al., 2011). Die Emissionen verringern sich mit abnehmenden organischen Substanzen, zunehmendem Breitengrad, abnehmender Wassertemperatur, zunehmendem Alter und höheren Drücken (atmosphärisch und Wasserdruck). Zudem ist das Verhältnis von CH_4- zu CO_2-Emissionen in den gemäßigten Zonen kleiner als in den Tropen (Barros et al., 2011).

Zu Emissionen aus Staubecken in Österreich gibt es derzeit keine Untersuchungen; die folgenden Aussagen beruhen auf allgemeinen Überlegungen auf Grund internationaler Untersuchungen und können bis zum Vorliegen von österreichspezifischen Messungen nicht als gesichert angesehen werden. Da sich die meisten Speicherkraftwerke in alpinen Bereichen befinden und die überflutete Breite von Stauräumen bei Laufkraftwerken eher gering ist, ist zu vermuten, dass die Emissionen aufgrund der Größe der überstauten Bereiche bzw. der Menge des organischen Materials eher gering sind, der Eintrag von außen jedoch eine Rolle spielen könnte. Zudem wird auf Grund des allgemein guten Gewässerzustandes (geringe organische Verschmutzung der Gewässer in Folge einer flächende-

ckenden Abwasserentsorgung sowie nur punktuell vorhandene Eutrophierungsprobleme) in jenen Gewässern, die für eine Wasserkraftnutzung in Frage kommen, das Potenzial für die THG-Emission als gering eingeschätzt. Weiters ist aufgrund geringerer Wassertemperaturen in höheren Lagen der Abbauprozess verlangsamt – dieser könnte mit der Klimaänderung und dem damit verbunden Anstieg der Wassertemperatur aber zunehmen.

Bei der Bilanzierung der Wasserkraft in Bezug auf die CO_2-Neutralität sind nicht nur die Emissionen aus den Staubecken zu beachten, sondern auch der Verlust an Kohlenstoffsenken, welche durch Überflutungen nicht mehr zur Verfügung stehen (St. Louis et al., 2000). Um etwaige Emissionen zu vermindern, ist bei Neuanlagen vor allem der Standort (vorhandene Biomasse / Landnutzung, Wassertemperaturen / Seehöhe / Breitengrad, Menge möglicher organischer Einträge, etc.) entscheidend. Da auch Wasserspiegelschwankungen Einfluss auf die Produktion von CO_2 und CH_4 haben können, können die Emissionen durch eine geeignete Betriebsweise der Wasserkraftwerke vermindert werden. Insgesamt wird das THG-Minderungspotenzial bei THG-Emissionen aus Staubecken als gering eingeschätzt.

THG-Reduktion in der Siedlungswasserwirtschaft

THG-Emissionen in der Siedlungswasserwirtschaft erfolgen in den Systembereichen Kanalisation und Kläranlagen. Hingegen entstehen durch die Trinkwasserversorgung selbst keine relevanten Mengen an THG.

Auf dem Weg von der Sammlung der Abwässer aus Haushalten, Gewerbe und Industrie zur Reinigung in Kläranlagen findet in Abhängigkeit von zahlreichen Rahmenbedingungen (Abwasseranfall, Gefälle, Aufenthaltszeit, Fremdwasseranteil, Kanallänge, Freispiegelleitung, Druckleitung, Trennsystem; Mischsystem, Redoxbedingungen, etc.) ein biologischer Vorabbau in der Kanalisation statt. An relevanten THG entstehen dabei CH_4, CO_2 sowie potentiell N_2O. Über tatsächlich entstehende Mengen und eine Extrapolation auf Österreich gibt es keine Untersuchungen; belastbare Zahlen dürften auf Grund der Heterogenität der relevanten Rahmenbedingungen nur schwer zu erheben sein. Eine gewisse THG-Minderung im Bereich der Kanalisation ist jedoch als Nebeneffekt von Maßnahmen zur Geruchsbekämpfung (CH_4-Reduktion durch Verminderung ausgedehnter anaerober Zustände) und zur Vermeidung von Fremdwasserzutritten anzunehmen.

In Kläranlagen entsteht im Zuge des biologischen Abbaus organischer Verbindungen durch aerobe Atmung CO_2, das zu > 95 % (McInnes, 1996) systembedingt in die Atmosphäre weitergeleitet wird. Dies erfolgt durch die Belüftungssysteme, welche den für den Abbau notwendigen Sauerstoff in das System eintragen und dadurch das parallel gebildete CO_2 freisetzen. Die produzierte Menge an CO_2 hängt primär von der anfallenden, zu reinigenden Schmutzfracht der Kläranlage ab. Für die tatsächlich emittierten Mengen sind zudem auch Temperatur, Kläranlagenbelastung, Wasserhärte, pH-Wert, Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht sowie die Kohlenstofffixierung durch Bakterien, die eine Nitrifikation von Ammonium im Abwasser bewerkstelligen, von Bedeutung. Auch bei der Stickstoffentfernung (Denitrifikation von NO_3 zu gasförmigem N_2) entsteht stöchiometrisch CO_2, das aus den daran anschließenden belüfteten Anlagenteilen freigesetzt wird. In Hinblick auf eine Verringerung der CO_2-Emissionen aus Kläranlagen besteht systembedingt kein Potenzial, da die gebildeten Mengen quantitativ von der abzubauenden Schmutzfracht abhängen und eine Verminderung nur durch eine Verringerung des aeroben, anoxischen und anaeroben bakteriellen Abbaus organischer Verbindungen möglich wäre, was der zentralen Aufgabe der Abwasserreinigung – der Entfernung organischer Verschmutzungen – diametral entgegenstehen würde.

Ähnlich der Kanalisation führen jedoch bereits laufende Maßnahmen zur Energieoptimierung in Abwasserreinigungsanlagen indirekt auch zu einer Verminderung der mit Energieversorgung verbundenen THG-Emissionen. Besonders für große Anlagen (> 50 000 EW)ist es möglich, im Jahresmittel energieautarke Kläranlagen zu realisieren (Svardal und Kroiss, 2011), die ihre Energie aus dem zu reinigenden Abwasser selbst beziehen. In der Hauptkläranlage Wien wurde die Projektstudie EOS (Energie-Optimierung Schlammbehandlung) durchgeführt, die eine Verringerung der CO_2-Emissionen um ca. 40 000 t / Jahr erreichen soll (Svardal et al., 2012). Eine Verminderung der biologischen CO_2-Emissionen aus Kläranlagen wird in diesen Fällen durch – auch für kleinere Abwasserreinigungsanlagen in der Größenordnung von 10 000 EW vermehrt angedachte – Biogasanlagen zur anaeroben Umwandlung von organischem Kohlenstoff in Methan und anschließender Verstromung zur Energieversorgung der Kläranlage erreicht. Hierbei handelt es sich letztlich um eine Verlagerung des CO_2-Stoffstroms aus der biologischen Atmung in eine technische Schiene (Verstromung von Biogas) mit dem Vorteil einer energetischen Nutzung. Das im Zuge der Biogasproduktion entstehende Methan (CH_4) wird in einem geschlossenen System gehalten und gelangt somit nicht in die Atmosphäre. CH_4 kann bei unsachgemäßem Betrieb auch aus Vorklärungsstufen freigesetzt werden.

N_2O-Emissionen können als Nebenprodukt sowohl bei der Nitrifikation (Umwandlung von Ammonium (NH_4) in Nitrat (NO_3)) als auch bei der Denitrifikation (Abbau von

Nitrat (NO_3^-) zu Stickstoffgas (N_2)), als Nebenprodukte anfallen. Da nur in belüfteten Becken ein effizienter Gasaustausch erfolgt, wird Lachgas (N_2O) primär aus aeroben Becken emittiert. Angaben zu emittierten Mengen liegen bei 1–35 % des entfernten Stickstoffs (Kampschreura et al., 2009). Ein Forschungsprojekt zur Erhebung des Reduktionspotenzials bei den N_2O-Emissionen aus Kläranlagen durch Optimierung des Betriebes (ReLaKO, IWAG-TU, 2012) widmet sich hier detailliert der Thematik. Neben der Erhebung belastbarer Zahlen für die N_2O-Produktion im Rahmen der Abwasserreinigung werden in diesem Projekt auch konkrete Handlungsanweisungen für eine Reduktion der Emissionen von N_2O durch eine optimierte Betriebsführung der Denitrifikation erarbeitet. Verfahren der Denitrifikation, die auf die Zugabe externer Kohlenstoffquellen angewiesen sind (nachgeschaltete Denitrifikation), führen stöchiometrisch zur Bildung von zusätzlichem CO_2. Da derartige Verfahren in Österreich jedoch (im Gegensatz etwa zu Deutschland) in kommunalen Anlagen nicht im Einsatz sind, besteht diesbezüglich kein THG-Minderungspotenzial.

2.4.2 Anpassungsmaßnahmen in der Wasserwirtschaft und im Gewässerschutz

Hochwasser

Aufgrund der Schwierigkeiten und Unsicherheiten, die bei der Modellierung von zukünftigen, klimaveränderten Abflüssen, also etwa einer Veränderung der Wasserführung der Flüsse, auftreten (Hennegriff et al., 2006), gelten die Aussagen über den Hochwassertrend als eher unsicher (vgl. Band 2, Kapitel 2). In den vorhandenen Klimastudien (Blöschl et al., 2008, 2011, Formayer und Kromp-Kolb, 2009a, b; Fuchs, 2005; Habersack et al., 2011a, Holzmann et al., 2010, Nachtnebel, 2008) reicht die Bandbreite der Szenarien für österreichische Einzugsgebiete (EZG) in diesem Jahrhundert von einer Abnahme bis zu einer Zunahme von Hochwässern, wobei hier zwischen saisonalen Verschiebungen sowie Aussagen über Intensitäten zu unterscheiden ist.

Zur Verringerung des Hochwasserrisikos können folgende Maßnahmen beitragen:

- Maßnahmen im Zusammenhang mit passivem und aktivem Hochwasserschutz sowie Landnutzungsänderungen:

Vom Umweltbundesamt (2010a, b) werden robuste Maßnahmen, wie z. B. die Schaffung von Retentionsräumen und der Aufbau von Hochwasserwarnungen, vorgeschlagen, um Hochwässer schadlos abzuführen bzw. rechtzeitig für mobilen Hochwasserschutz zu sorgen. Eine weitere Maßnahme beinhaltet die Schaffung von rechtlichen Elementen, die für den Rückhalt geeignete Flächen freihalten und somit zur Retention der Hochwasserwelle beitragen können. Hierfür ist eine fachlich fundierte Untersuchung und Bewertung von Überflutungsflächen anzustreben (Habersack et al., 2008, 2010). Neben der Klimaänderung können Landnutzungsänderungen einen großen Einfluss auf die Hochwasserentstehung haben (Habersack et al., 2009). Vor allem in kleinen Einzugsgebieten kann der Einfluss größer sein als der des Klimawandels (Habersack et al., 2011a). Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass sich durch eine veränderte Landnutzung eine Änderung des Abflussbeiwertes und somit des Abflusses ergibt und dass Versiegelungen und Verbauungen das Hochwasserrisiko erhöhen.

- Veränderung/Aktualisierung von Hochwasserbemessungswerten (z. B. Durchfluss):

Eine Anpassung an veränderte Hochwasserrisiken erfordert einerseits eine Überprüfung und Aktualisierung der Bemessungswerte (z. B. HQ100, d. h. Hochwasser, das einmal in 100 Jahren erreicht oder überschritten wird), andererseits eine Verbesserung der Datenbasis (Umweltbundesamt, 2010b). In Bayern und Baden-Württemberg wurde ein Klimaänderungsfaktor eingeführt, der für Neubauten von Hochwasserschutzanlagen den Bemessungswert dahingehend verändert/erhöht, dass zukünftige Klimaänderungen berücksichtigt werden können (KLIWA, 2006). Der Klimaänderungsfaktor variiert je nach Region und Jährlichkeit des Bemessungswertes von 1,00 bis 1,75. Derzeit ist laut Blöschl et al. (2011) für Österreich aber keine Änderung der Bemessungswerte, wie in Deutschland vorgeschlagen, nötig, da die Unsicherheiten bei der Ermittlung der Bemessungswerte größer sind als die Veränderungen durch den Klimawandel.

Niederwasser

In den Alpen Österreichs werden die Abflüsse bei Winterniederwasser wegen höherer Lufttemperaturen deutlich erhöht, was als positiv zu betrachten ist. In den Flachlandregionen Ost- und Südösterreichs kann eine Abnahme der Abflüsse bei Niederwasser eintreten (vgl. Band 2, Kapitel 2). Mit dem Auftreten von Niederwasser sind nicht nur quantitative Probleme, wie z. B. mangelnde Versorgungssicherheit, Einschränkungen in der Transportkapazität an Flüssen (BAFU, 2012; Koetse und Rietveld, 2009), sondern auch qualitative Veränderungen wie z. B. der Gewässertemperatur, verbunden (vgl. Band 2, Kapitel 2 und Kapitel 3).

Die Auswirkungen von Niederwasser können durch Wasserentnahmen, z. B. für die Energieerzeugung, Bewässerung oder für die Verwendung als Kühlwasser, verstärkt werden. Durch das geringe Abflussvolumen bei Niederwasser verschärfen sich Probleme bei der Einleitung von Abwässern. Ein Beispiel dafür ist eine geringere Verdünnung der Abwässer und somit höhere Immissionskonzentrationen (Kreuzinger und Kroiß, 2011).

Folgende Anpassungen der Wasserwirtschaft an vermehrtes Auftreten von Niederwasser sind möglich:

- Generelle Anpassungen an Niederwasser:

Im Falle eines vermehrten Auftretens von Niederwasser sind wasserwirtschaftliche Maßnahmen, wie Frühwarnsysteme, Speicherbewirtschaftung zur Aufhöhung von Niederwasser, Eingriffe in bestehende Wasserrechte (Einschränkungen in der Entnahme/Nutzung oder Einleitung, etc.), denkbar (Blöschl et al., 2011).

- Anpassung der Anforderungen an die Einleitung von Abwässern:

Eine Bewertung der Auswirkungen von Kläranlagen und Mischwasserentlastungen auf Gewässer erfolgt bereits heute nach dem kombinierten Emissions-Immissionsansatz unter Berücksichtigung des Zustands und des Zielzustands der empfangenden Gewässer. Relevante Faktoren sind dabei einerseits direkt wirkende Faktoren (sauerstoffzehrende, toxische, eutrophierende Substanzen) aber auch sekundär andere Faktoren beeinflussende Parameter (Temperatur – Sauerstofflöslichkeit; pH-Werte – Dissoziationsgleichgewichte). Für Vorfluter, in denen abnehmende Niederwässer erwartet werden können, ist zur Verminderung des Eutrophierungspotenzials eine über das heutige Maß hinausgehende Phosphor-Entfernung (z. B. auf 0,5 mg/l Gesamtphosphor) auf Kläranlagen jedenfalls sinnvoll und auch umsetzbar (Blöschl et al., 2011). Im Falle einer geringen Verdünnung der gereinigten Abwässer infolge einer reduzierten Wasserführung kann es zudem zu niedrigen Sauerstoffkonzentrationen kommen (der Kläranlagenablauf weist verfahrenstechnisch bedingt Sauerstoffwerte weit unter der Sättigung auf). Dem kann durch eine Vorbelüftung des Kläranlagenablaufs einfach entgegengewirkt werden. Ein weiterer wichtiger Aspekt verminderter Abflüsse in den Vorflutern liegt im geringeren Verdünnungspotenzial für Spurenstoffe, die in Kläranlagen nicht oder nur teilweise entfernt werden können, wie Industriechemikalien, pharmazeutische Wirkstoffe oder andere Stoffe im Konzentrationsbereich von wenigen Mikrogramm oder Nanogramm pro Liter. In diesem Fall werden zurzeit weitergehende Reinigungsschritte mit Hilfe von Ozon oder Aktivkohle zur Emissionsverminderung untersucht (Kreuzinger und Schaar, 2012), die lokal die Gewässergüte verbessern könnten. Derartige zusätzliche Reinigungsschritte sind allerdings mit einem zusätzlichen Energieeinsatz verbunden.

- Anpassung der Ausleitung für Wasser und die Restwasserproblematik:

Wasserentnahmen stellen eine Belastung dar, wenn die Restwassermenge unterhalb der Entnahme nicht ausreichend ist (Habersack et al., 2011a). Dies kann vor allem bei extremen Niederwässern erreicht werden. Es ist daher ein ökologisch erforderlicher Mindestwasserabfluss nötig, der auch bei Niederwasser eingehalten wird. Um dies zu erreichen, kann ein Eingriff in bestehende Wasserrechte sowohl bei Kraftwerksbetreibern als auch bei anderen Nutzern notwendig sein (Blöschl et al., 2011).

- Anpassung der Schifffahrt an eine vermehrt auftretende Niederwasserführung:

Um die Auswirkungen von vermehrt auftretendem Niederwasser auf die Schifffahrt zu minimieren, schlägt das BAFU (2012) punktuelle Maßnahmen an Wasserstraßen sowie die Ausschöpfung technischer Möglichkeiten im Schiffbau vor. Als punktuelle Maßnahmen werden die Beseitigung von lokalen Hindernissen sowie die Vertiefung der Fahrwasserrinne genannt. Ein weiteres Instrument um die Transportkapazitäten während Niederwassersituationen zu optimieren, ist die Verbesserung der 4–5 Tages-Wasserstandsvorhersagen für schiffbare Flüsse.

Anpassung an ein erhöhtes Geschiebe- und Schwebstoffpotenzial

Durch den Klimawandel ist ein erhöhtes Geschiebe- und Schwebstoffpotenzial in Gewässern zu erwarten (vgl. Band 2, Kapitel 4). Infolge eines modifizierten Feststoffhaushalts können Veränderungen des Transportregimes und der Gewässermorphologie hinsichtlich Gewässerbreite, Wasserführung, Fließgeschwindigkeit, Gefälle und Sohlschubspannung auftreten (Habersack et al., 2011a).

Neben diesen Veränderungen sind auch technische Probleme (Verlegung von Rechen, Abrasion an Turbinen, etc.), Sicherheitsprobleme (Standsicherheit, gesteigertes Hochwasserrisiko, etc.), ökonomische Probleme (Reduktion der Stromerzeugung durch Verringerung des nutzbaren Stauraumvolumens, Betriebsunterbrechungen während Reparatur- und Instandhaltungsmaßnahmen, etc.) und ökologische Probleme (Verstopfung des Schotterlückenraums mit feinen Sedimenten, die die Wasserdurchlässigkeit verringern (Kolmation),

Stauraumspülungen, etc.), die durch den erhöhten Sedimentinput entstehen, zu bedenken (Habersack et al., 2011a, Habersack und Schneider 2001).

Aufgrund der unterschiedlichen Verhaltensweisen von Schwebstoffen und Geschiebe ist bei der Beurteilung der Auswirkungen und folglich auch bei den Adaptionsmöglichkeiten der Wasserwirtschaft an geänderte Geschiebe- und Schwebstoffpotenziale eine getrennte Behandlung sinnvoll (Habersack und Schneider, 2001). Durch die Erhöhung des Schwebstoffeintrags in das Gewässer kann es in Bereichen mit geringen Fließgeschwindigkeiten zu Ablagerungen und schnellerer Verlandung kommen. Ablagerungen von Feinsedimenten in und auf gröberem Substrat können zur Kolmation führen, wodurch der Wasseraustausch zwischen Fluss und Flusssohle verringert und eine ausreichende Sauerstoffversorgung von im Substrat lebenden Organismen erschwert wird (Bilotta and Brazier, 2008; Jungwirth et al., 2003). Zudem kann es durch die geringere Sauerstoffversorgung zum Absterben von Fischeiern und -larven kommen. Insgesamt wird durch die Feinmaterialablagerung die Qualität einer Kies-/Schotterbank als Laichhabitat für Fische beeinträchtigt.

Erhöhte Ablagerungen treten vor allem im Bereich von Stauanlagen und Speichern auf und können dort zu gravierenden Problemen führen. Die weltweit mittlere Verlandungsrate von Stauräumen wird bis heute auf etwa 0,8 %/Jahr geschätzt (Schleiss et al., 2010). Wie schnell sich die Ablagerungen zu einem Problem für den Betrieb und die Sicherheit von Speichern entwickeln, ist abhängig von der Größe und dem Typ des Speichers (Habersack und Schneider, 2001) aber auch der klimatischen Lage, der Konzeption des Bauwerks (Schleiss et al., 2010) und der Stauraumbewirtschaftung (Habersack et al., 2002). Kleine Speicher haben aufgrund der kurzen hydraulischen Verweilzeit eine geringe Auffangeffektivität. Bei großen Speichern führt der genügend große Totraum dazu, dass auch bei langjähriger Sedimentation keine Auswirkung auf den Betrieb auftreten. Am gefährdetsten sind Tages- oder Wochenspeicher, bei denen es aufgrund der längeren Verweilzeiten zum Absinken der Schwebstoffe kommen kann und die keinen ausreichend großen Totraum besitzen (Habersack und Schneider 2001).

Neben den Ablagerungen können aber auch die erhöhten Feststoffkonzentrationen an sich ökologische Probleme hervorrufen. Erhöhte Konzentrationen stellen für Fische und Makrozoobenthos (größere, d.h. mit freiem Auge erkennbare, bodenlebende Tiere) eine Sichtbehinderung dar, die sich auf die Nahrungsaufnahme auswirken kann (Harvey und White, 2008). Bei Fischen und Invertebraten kann eine erhöhte Schwebstoffkonzentration zur Schädigung der Atemwege führen, sie setzt die Tiere einem höheren Stressfaktor aus (Bilotta and Brazier, 2008; Jungwirth et al., 2003; Schmutz, 2003) und hat durch eine Substratveränderung Auswirkungen auf Laicherfolge der Fische und den unmittelbaren Lebensraum von Makrozoobenthos. Zudem kann es auch zum Ablösen von Algen und Makrozoobenthos vom Substrat kommen, wodurch sich Auswirkungen auf die Nahrungskette ergeben.

Die Wirkung der Schwebstoffe auf die Gewässerfauna ist jedoch nicht alleine von der Konzentration abhängig. Ausschlaggebend für die Größenordnung sind neben der Konzentration auch die Dauer, die geochemische Zusammensetzung und die Korngrößenverteilung der transportierten Sedimente (Bilotta und Brazier, 2008), aber auch der Auftrittszeitpunkt in Abhängigkeit vom Entwicklungszustand z.B. von Fischlarven und Jungfischen (Eberstaller et al., 2008). Erhöhte Geschiebeeinträge führen unter anderem zu Auf- und Verlandungen und können zu erhöhtem Hochwasserrisiko beitragen. Andererseits sind Geschiebeeinträge in gewissem Maße notwendig, um morphologische Strukturen und damit Habitate zu erhalten.

Folgende Adaptionen zur Anpassung der Wasserwirtschaft an ein erhöhtes Geschiebe- und Schwebstoffpotenzial sind möglich:

- Verminderung des Schwebstoff- und Geschiebeeintrages durch Maßnahmen im Einzugsgebiet:

Grundsätzlich ist die Minderung des Eintrages durch Maßnahmen im Einzugsgebiet eine Adaption an erhöhte Sedimentpotenziale. Hierunter fallen z.B. Erosionsschutz durch Bepflanzungen und Hangstabilisierungen, Geschieberückhaltebecken, Kiesfänge, Vorbecken oder Vorsperren (Schleiss et al., 2010). Allerdings führt bereits heute der Rückhalt von Geschiebe im Einzugsgebiet und ein fehlendes Sedimentkontinuum in vielen Gebieten zu negativen Auswirkungen auf die Fließgewässermorphologie, z.B. zu einer Eintiefung der Flusssohle, zu einem Verlust an dynamischen Schotterbänken und von Gewässerstrukturen (Habersack et al., 2011 a; Habersack, 2009). Auch der schadlose Weiter- und Durchtransport der Feststoffe über geeignete Managementmaßnahmen stellt eine Möglichkeit der Anpassung dar.

- Anpassung der Betriebsordnung von Wasserkraftanlagen, bauliche Maßnahmen zur Verringerung der Verlandungen von Speicherseen durch Schwebstoffe:

Um erhöhten Schwebstoffeintrag in Stauräumen und daraus resultierende Probleme (z.B. Verlandung) zu verhindern, kann bei bestehenden Kraftwerken eine Änderung der Betriebsordnung oder das Setzen von baulichen Maßnahmen sinnvoll

sein. Veränderungen der Betriebsordnung sind z. B. die Entladung des Stauraums durch Spülungen, Durchleiten von Trübeströmen, Turbinieren von Schwebstoffen, Um- und Überleitungsstollen oder Baggerungen in zeitlich kürzeren Abständen (Badura und Schneider, 2008). Bauliche Maßnahmen sind z. B. Einbauten wie Unterwasserdämme, die Trübeströme zu vorzeitigem Erliegen bringen, und somit eine Ablagerung in der näheren Umgebung der Sperre verhindern (Schleiss et al., 2010). Weiters kann bei Neubauten durch Erhöhung des Totraums einem zu schnellen Verlanden entgegengewirkt werden. Welche Maßnahmen im Einzelfall effektiv sind, hängt vom Stauraum ab, wobei auch die Vermeidung von negativen ökologischen Auswirkungen auf die Unterlieger zu beachten ist.

- Maßnahmen, um Verlandungen von Stauräumen durch Geschiebe entgegen zu wirken:

Mögliche Maßnahmen sind die Installation von Vorbecken oder Vorsperren, wie sie z. B. am Speicher Sölk eingesetzt sind (Habersack und Schneider, 2001) und Baggerungen. Am nachhaltigsten wirksam wäre die Durchleitung des Geschiebes im Hochwasserfall (hier besteht allerdings noch Forschungsbedarf), was sich ökologisch positiv auf die Unterlieger auswirken würde (Eberstaller et al., 2008), locker gelagerte, unkolmatierte Schotterbänke als Laichhabitate schafft und eventuelle Sohleeintiefungen minimiert (Habersack et al., 2011 a).

- Anpassung der Geschiebebewirtschaftung an Änderungen im Geschiebetransport:

Da es durch erhöhte Geschiebefrachten auch zu Ablagerungen in Bereichen mit bereits erhöhtem Hochwasserrisiko kommen kann, sind die Einführung und Anpassung von Konzepten zur Geschiebebewirtschaftung an Flüssen erforderlich (Habersack et al., 2011b; GschV, 1998).

- Anpassung an ein erhöhtes Geschiebepotenzial im Bereich von Geschieberückhalteräumen und Rückhaltebecken:

Durch die größeren Einträge kann eine Anpassung der Instandhaltungsmaßnahmen bei Rückhaltebauwerken (z. B. häufigere Räumung) sinnvoll sein. Um einerseits Veränderungen in diesem Bereich festzustellen, aber auch um die Funktion für den Katastrophenschutz zu erhalten und einem möglichen Versagen der Bauwerke entgegenzuwirken, können Monitoringsysteme (z. B. Ereignisdokumentationen oder die regelmäßige Begehung und Beurteilung von Bauwerken) sinnvoll sein.

Anpassung der Wasserkraftnutzung an ein verändertes Wasserdargebot

Für die Beurteilung des Klimaeinflusses auf die Stromproduktion aus Wasserkraft sind die Veränderung des mittleren Abflusses sowie dessen saisonale Verteilung von Bedeutung. Veränderungen von Extremwerten (Niederwasser und Hochwasser) spielen für die Hochwassersicherheit der Anlage und die Ökologie der beeinflussten Fließstrecken eine Rolle. In mehreren Studien wurde die Auswirkung der Klimaänderung auf die Energieproduktion behandelt (Habersack et al., 2011a; Hänggi und Plattner, 2009; Horton et al., 2006; Kranzl et al., 2010; Lehner et al., 2005; Piot, 2005; Pirker, 2007; Vicuna et al., 2008). Es konnte festgestellt werden, dass es zu einer jahreszeitlichen Verlagerung der Produktion vom Sommer- auf das Winterhalbjahr kommen wird. Je nach angenommenem Szenario kann es zu einer Senkung der nationalen jährlichen Stromerzeugung aus Wasserkraft von 6–15 % bis zum Ende dieses Jahrhunderts kommen (Kranzl et al., 2010). Im Gegensatz dazu erwarten Blöschl et al. (2011) einen eher günstigeren Einfluss des Klimawandels auf die Wasserkraftproduktion, mit einer mittleren jährlichen Änderung von weniger als ±5 %. Als Grundlage für die Analyse der Stromerzeugung aus Wasserkraft wurden die IPCC-Szenarien A2, B1 und A1B verwendet. Der Referenzwert für die Ermittlung der zukünftigen Änderungen wurde von Kranzel et al. (2010) mit der Periode 2011–2040 gewählt. Die prozentuellen Änderungen von Blöschl et al. (2011) beziehen sich auf die Periode 1976–2006.

Neben den Auswirkungen auf die Stromproduktion untersuchten Habersack et al. (2011a) auch die Vulnerabilität verschiedener Wasserkraftwerkstypen auf die Auswirkungen des Klimawandels. Insbesondere große Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke wurden – im Gegensatz zu Laufkraftwerken – als eher robust eingestuft, da sie durch ihre Speicherkapazität je nach Speicherfüllungsgrad Abflussschwankungen puffern und damit auch zur Senkung von Hochwassergefährdungen beitragen können (siehe auch Kranzl et al., 2010; Austroclim, 2008). Im Allgemeinen nimmt die hochwasserdämpfende Wirkung von Speicher- und Pumpspeicherkraftwerken zu, je größer die Pufferkapazität im Verhältnis zum Abfluss ist (OcCC, 2007). Bei Laufkraftwerken hingegen können klimabedingte Hochwasserzunahmen zu Betriebsbeeinträchtigungen (Habersack et al., 2011a) und zu einem erhöhten Zerstörungsrisiko führen, wie etwa im Fall der Zerstörung des Kraftwerks Reutte im Jahr 2005 (Habersack et al., 2009).

Zunahmen von Niederwasser führen bei Wasserkraftanlagen meist zu negativen Auswirkungen auf die Ökologie der Unterwasser- und Ausleitungsstrecken (z. B. Restwasserprob-

lematik) und auf die Stromproduktion. Weiters kann es durch Klimaänderungen zu Hanginstabilitäten und damit zu plötzlichen Materialeinträgen in Speicherbecken kommen, welche Schwallwellen auslösen und verheerende Zerstörungen zur Folge haben können (Hauenstein, 2008).

Folgende Anpassungen der Wasserkraftnutzung an ein verändertes Wasserdargebot sind möglich:

- Anpassung der Wasserkraftnutzung zur Erhöhung der Versorgungssicherheit in der Energieversorgung:

Blöschl et al. (2011) gehen von günstigen Auswirkungen des Klimawandels auf das Wasserkraftpotenzial aus, wodurch kein Handlungsbedarf im Bereich der Stromerzeugung aus Wasserkraft gesehen wird, während andere Studien einen Rückgang von 15 % für möglich halten (Kranzl et al., 2010). Bei einem zukünftigen Ausbau der Wasserkraft ist zu bedenken, dass Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke mit größerem Speichervermögen und Laufkraftwerke an größeren Flüssen tendenziell bessere Nutzungsgrade aufweisen (Pöyry Energie GmbH, 2008). Zudem werden Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke generell als weniger vulnerabel gegenüber dem Klimawandel eingestuft. Zur Erzielung einer sinnvollen und nachhaltigen Entwicklung der Wasserkraft ist jedoch eine integrative Lösung im gemeinsamen Dialog mit Entscheidungsträgern zu empfehlen (Ausgleich zwischen Klimawandel, Energiewirtschaft und Ökologie); außerdem sind die Grenzen des verfügbaren Wasserkraftpotenzials in Österreich sowie des Vorhandenseins von naturbelassenen Flüssen zu bedenken (Habersack et al., 2011a).

- Schutz der Kraftwerke vor klimabedingten Naturereignissen, z. B. Hochwasser:

Der schadlosen Bewältigung von Hochwässern ist mit einer geeigneten Betriebsweise oder mit baulichen Veränderungen beizukommen. Voraussetzungen dafür sind die Vorhersage von Ereignissen und die Ausführung von damit verbundenen Maßnahmen wie der Absenkung des Stauziels (Habersack et al., 2011a).

Anpassung in der Fischereiwirtschaft

Eine wichtige Strategie der Klimaanpassung hinsichtlich Fischlebensgemeinschaften stellt die Stärkung der Resilienz (Störungstoleranz) der Ökosysteme durch Verminderung weiterer menschlicher Eingriffe und Verbesserung der aktuellen Lebensraumbedingungen dar. Dadurch können Fischpopulationen gestärkt werden, wodurch sie den Folgen der Klimaänderungen besser standhalten können (vgl. Band 2, Kapitel 3).

Während 95 % der österreichischen Seen keine ökologischen Defizite aufweisen, gelten 63 % der österreichischen Fließgewässer als beeinträchtigt. Die Ursachen dafür sind vor allem hydromorphologische Belastungen durch Fließgewässerregulierung und -verbauung sowie durch die Wasserkraftnutzung. Zu möglichen Sanierungsmaßnahmen zählen der Bau von Fischwanderhilfen, die Abgabe ökologisch verträglicher Restwassermengen, eine Dämpfung der durch Spitzenstromerzeugung verursachten Schwälle, Flussrevitalisierungen und Restrukturierungen (BMLFUW, 2010).

Dabei sind Wechselwirkungen mit anderen Maßnahmen zu berücksichtigen. So bewirkt z. B. der Ausbau der Wasserkraft als Beitrag zur Erhöhung der erneuerbaren Energieträger eine weitere Verschlechterung des ökologischen Zustands der Fließgewässer (vgl. Band 2, Kapitel 2). Der umfassenden Abwägung von ökologischen Interessen mit jenen von Klimaschutz und Energiewirtschaft kommt dabei große Bedeutung zu (Habersack et al., 2011b), etwa indem jene Wasserkraftwerke prioritär umgesetzt werden, die einen signifikanten Beitrag zum Klimaschutz leisten und gleichzeitig möglichst geringe ökologische Schäden verursachen (Schmutz et al., 2010).

Eine Maßnahme zur Abschwächung der Wassertemperaturzunahmen infolge des Klimawandels stellt die Erhaltung und Wiederherstellung von flussbegleitendem Uferbewuchs dar (vgl. Band 2, Kapitel 2). Der Uferbewuchs verringert vor allem bei kleineren Fließgewässern über die Beschattung die Sonneneinstrahlung und reduziert somit insbesondere im Hochsommer die Temperaturspitzen. Das gesamte Gewässernetz der österreichischen Fließgewässer umfasst ca. 100 000 km, wovon 13 % große Flüsse, 32 % mittelgroße Bäche und 56 % kleine Bäche sind. Aufgrund der Überzahl an kleinen Bächen wirken sich dort umgesetzte Maßnahmen auch auf die flussabliegenden größeren Bäche und Flüsse positiv aus.

Das Projekt Bioclic[7] zielt darauf ab, Minderungseffekte der Ufervegetation und deren Auswirkungen auf Fischnährtiere und Fischgesellschaften betreffend des Klimawandels zu erforschen und Empfehlungen für das Gewässermanagement abzuleiten (Holzapfel et al., 2012). Aufgrund der Klimaerwärmung ist mit einer Änderung der Fischfauna in Seen und Fließgewässern zu rechnen (vgl. Band 2, Kapitel 3).

Wie eine Untersuchung von Hauer et al. (2013) zeigt, hat die Flussmorphologie, insbesondere die Strukturierung im Längsprofil (z. B. Kolk-Furt Sequenzen), großen Einfluss auf die Auswirkung von Temperaturänderungen auf die Habitatverfügbarkeit und Wandermöglichkeit von Fischen. Dies deutet darauf hin, dass durch geeignete Strukturierungsmaß-

[7] https://forschung.boku.ac.at; http://bioclic.boku.ac.at/index.php

nahmen bzw. die Erhaltung naturnaher Gewässerstrukturen die Auswirkung des Klimawandels auf die Fische gemindert werden kann.

Die Bewirtschaftung der Gewässer durch Fischerei ist an diese Veränderungen anzupassen. Am stärksten betrifft das die Unterläufe der Forellengewässer. Allerdings liegen hierzu bisher nur wenige Untersuchungen vor. Anpassungen können auch im Bereich von Aquakulturen sinnvoll sein, um mit veränderten Wassertemperaturen und hydrologischen Bedingungen umgehen zu können.

Anpassungen der Siedlungswasserwirtschaft an ein geändertes Wasserdargebot

Neunteufel et al. (2012) untersuchten im Detail den Wasserbedarf für die Trinkwasserversorgung von Haushalten. Neben einer Analyse der Verbrauchsdaten unterschiedlicher Bevölkerungsgruppen werden auch saisonale Abhängigkeiten und zukünftige Entwicklungen thematisiert. Vor allem durch die Verwendung wassersparender Geräte und Installationen (Waschmaschinen, Geschirrspüler, WC-Spülungen, etc.) kam es in den letzten 30 Jahren in Österreich regional unterschiedlich zu einer Reduktion des Wasserbedarfs von etwa 200 Liter pro Person und Tag auf heute 130 Liter pro Person und Tag. Am deutlichsten mit der Temperatur gekoppelt ist der Wasserbedarf für Gartenbewässerung, Befüllung von Schwimmbädern oder Autowaschen im ländlichen Bereich. Es kann erwartet werden, dass diese Verbrauchskomponenten durch eine Zunahme der Temperaturen zukünftig ansteigen werden.

Stärker als eine Zunahme des Wasserbedarfs könnten sich eine klimabedingte Verminderung von Niederschlägen sowie sinkende Grundwasserneubildungsraten und Quellschüttungen und damit eine Reduktion der Rohwasserverfügbarkeit auf die Sicherheit der Trinkwasserversorgung auswirken. Von einem generellen Mangel an Rohwasser für eine gesicherte Trinkwasserversorgung muss dennoch nicht ausgegangen werden (Blöschl et al., 2011; De Toffol et al., 2009). Insbesondere kleinräumig strukturierte Versorgungseinheiten weisen eine hohe Abhängigkeit von lokalen Veränderungen der Rohwasserverfügbarkeit, geringe Redundanzen für Rohwasserentnahme und gleichzeitig hohe Spitzenfaktoren für die Bemessung der Versorgung auf, sodass kleine Einheiten im Gegensatz zu großen Versorgungseinheiten eine höhere Vulnerabilität aufweisen. Speziell in Gebieten mit schwach ausgeprägten, nicht zusammenhängenden Grundwasserkörpern, wie im Kristallin oder Flysch, ist dies zu berücksichtigen. Das betrifft nicht nur die quantitativen Aspekte, sondern trifft auch in Hinblick auf qualitative Defizite zu, wenn Extremereignisse die Rohwasserqualität negativ beeinflussen. So können etwa Starkregen zu Überflutungen von Brunnen führen, was zum Eintrag von Bakterien führt und somit die hygienischen Bedingungen negativ beeinflusst. Die Vernetzung der v. a. kleinen ländlichen Versorgungseinheiten untereinander und mit größeren Versorgern stellt somit eine wesentliche Adaptionsstrategie zur Gewährleistung einer zukünftigen Versorgungssicherheit dar. Auf die Möglichkeit einer Nutzung unterschiedlicher, unabhängiger Rohwasserquellen ist jedoch auch seitens größerer Versorgungseinrichtungen zu achten (Blöschl et al., 2011).

Für Nutzungen, die eine im Vergleich zu Trinkwasser geringere Qualität erfordern und für die signifikante Wassermengen verwendet werden (z. B. Golfplätze, öffentliche Grünanlagen, Straßenreinigung), kann eine Wiederverwendung von entsprechend gereinigten Abwässern dort überlegt werden, wo sie wesentlich zur Steigerung der Versorgungssicherheit der Haushalte beitragen kann (Blöschl et al., 2011).

Für die Bemessungen von Einrichtungen der Kanalisation sind Veränderungen in der Nutzung bedeutsamer als klimatisch bedingte Veränderungen (Kleidorfer et al., 2009; Urich et al., 2013). Demographische und wirtschaftliche Entwicklungen, Flächenversiegelung, bedrohte Infrastruktur und Sicherheitsbedürfnisse sind hier die zentralen Aspekte für die Bemessung und Planung. Veränderungen der Höhe und zeitlichen Verteilung der Niederschläge über das Jahr haben auch eine Veränderung der Belastung der Gewässer durch Regenentlastung von Mischkanalnetzen (ein Teil des mit Regenwasser vermischen Abwassers wird direkt in das Gewässer geleitet, wenn die Kanäle die Wassermengen nicht fassen können) sowie von Regenwasserabflüssen aus den Regenwasserkanälen von Trennkanalisationen zur Folge. Unsicherheiten in hydrologischen Szenarien zu Extremereignissen (Trockenzeiten, Niederschläge; Hoch- und Niederwasser) erschweren eine Abschätzung der Häufigkeit akuter Schadwirkungen auf die empfangenden Gewässer. Änderungen in relevanten Bemessungsgrößen werden bereits heute berücksichtigt, weil bestehende Planungsansätze potentielle Auswirkungen zwar nicht explizit und prognostisch, aber konzeptionell und historisch mit berücksichtigen (Blöschl et al., 2011).

Höhere Temperaturen (Umgebungs- und Wassertemperatur) wirken sich auf die Funktion von Kläranlagen grundsätzlich positiv aus. Durch die Zunahme der Temperaturen erfolgt eine Beschleunigung biologischer und kinetischer Prozesse, die vor allem Kohlenstoffabbau, Nitrifikation, Denitrifikation sowie vermehrte biologische Phosphor-Entfernung betreffen, was pro Zeiteinheit zu einer Intensivierung der Abbauprozesse führt (Blöschl et al., 2011).

Maßnahmen zur Reduktion des Sedimenteintrags in Gewässer

Änderungen von Niederschlägen und Temperatur haben direkt und indirekt wesentlichen Einfluss auf Bodenerosion und Sedimenttransport (vgl. Band 2, Kapitel 4 und 5). Sie beeinflussen die pflanzliche Biomasseproduktion, die Bodenbedeckung, die Geschwindigkeit des Abbaus von Pflanzenresten, die Aktivität von Bodenmikroorganismen, Verdunstung und Bodenwassergehalt, Verschlämmung und Verkrustung der Bodenoberfläche, Änderung der Oberflächenrauigkeit, etc. (Williams et al., 1996; Pruski und Nearing, 2002a, b) (vgl. Band 2, Kapitel 5).

Derzeit werden in Österreich etwa 12 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche als erosionsanfällig eingestuft (Strauss und Klaghofer, 2006). Infolge eines möglichen diffusen Eintrags von Sedimenten und den daran gebundenen Nähr- und Schadstoffen in Oberflächengewässern hat eine Zunahme des Bodenabtrags auch negative Auswirkungen auf aquatische Ökosysteme. Summer et al. (1996) berechneten für den Zeitraum von 1950 bis 1990 eine Zunahme der Sedimentfracht im österreichischen Teil des Donaueinzugsgebiets um 32 %, wobei die Landwirtschaft als Hauptverursacher identifiziert wurde. Durch die Klimaänderung kann es vermehrt zu Erosion, und in weiter Folge zum Eintrag von Sedimenten in Gewässer kommen (vgl. Band 2, Kapitel 5). Es sind daher Adaptionsmaßnahmen zu setzen, die einerseits die Bodenerosion mindern (vgl. Band 2, Kapitel 2) und andererseits den Rückhalt von Material vor dem Eintrag ins Gewässer (z. B. durch Vegetationsstreifen) bewirken.

Anpassungen zur Verbesserung des Bodenwasserhaushalts

Es ist gut belegt, dass Veränderungen der Klimaparameter Niederschlag, Temperatur, etc. Auswirkungen auf die im Boden ablaufenden biologischen, chemischen und physikalischen Prozesse haben. Die lokalen Auswirkungen auf den Bodenwasser- und -nährstoffhaushalt und damit auch auf die Biomasseproduktion hängen aber auch von den Bodeneigenschaften selbst ab (Feichtinger und Stenitzer, 1995). Böden mit geringer Wasserspeicherkapazität reagieren sensibler auf Änderungen von Niederschlag und Temperatur. Auf tiefgründigen Böden mit hoher Wasserspeicherfähigkeit sind die Auswirkungen auf den Bodenwasserhaushalt sowie die pflanzenverfügbare Wassermenge deutlich geringer. Insgesamt gehen die Sickerwasserraten bei geringeren Niederschlägen zurück, besonders bei Böden mit hoher Wasserspeicherkapazität (Klöcking et al., 2009).

Befeuchtung und Austrocknung sowie Frost- und Tauprozesse beeinflussen maßgeblich die Bodenstruktur. Änderungen im Bodenwasserhaushalt können auch an staunassen Standorten sowie bei Böden auftreten, die zum Quellen und Schrumpfen neigen. Das unter trockenen Bedingungen häufigere Auftreten von Schrumpfrissen führt (kurzfristig) zu einer raschen Infiltration, aber auch zu einer Verringerung der Filterfunktion des Bodens, da dadurch der direkte Transport von Nähr- und Schadstoffen in tiefere Schichten bzw. ins Grundwasser bevorzugt wird. Änderungen der Lufttemperatur haben auch Einfluss auf die Abbauraten von organischer Bodensubstanz. Höhere Temperaturen beschleunigen den Abbauprozess (Berg et al., 1993; Kischbaum, 1995) und können zu einer Verringerung des Humusgehalts und zur Verschlechterung der Bodenstruktur führen.

Eine Optimierung des Bodenwasserhaushalts erfolgt durch die Steigerung der Bodenwasserspeicherfähigkeit wobei auch die Verfügbarkeit von pflanzennutzbarem Wasser erhöht wird. Bodenschonende Bearbeitungsverfahren wie Mulch- und Direktsaat können Bodenstruktur und Infiltration verbessern, vor allem wegen des gesteigerten Gehalts an organischem Kohlenstoff. Zudem vermindert die Mulchauflage die Evaporation bzw. die unproduktive Verdunstung von der Bodenoberfläche. Ein bewirtschaftungsbedingter Anstieg des Humusgehalts kann eine temperaturbedingte Abnahme deutlich überkompensieren. Der Anbau von Pflanzenarten und -sorten mit effektiverer Wasserausnutzung während der trockenen Jahreszeiten in der Fruchtfolge stellt eine weitere Möglichkeit zur Schonung der Bodenwasserreserven dar. Die Umstellung von Fruchtfolgen, in welcher mehr Winterungen als Sommerungen angebaut werden, kann den Bodenwasserhaushalt in den sensiblen, heißen Sommermonaten verbessern (vgl. Band 2, Kapitel 2).

2.4.3 Synergien und Trade-offs Anpassung und THG-Minderung

Adaptionsmaßnahmen in der Wasserwirtschaft haben vielfach keine oder nur geringe langfristige Auswirkungen auf die Steigerung oder Senkung von THG-Emissionen. Es kann jedoch durch bauliche Maßnahmen, wie z. B. die Errichtung von Flussbauwerken oder Anpassung von Betriebs- und Regelorganen, kurzfristig zu einem erhöhten Energiebedarf und erhöhten Emissionen an THG kommen.

Eine Maßnahme im Bereich der Wasserwirtschaft, die auch längerfristig zur THG-Reduktion beträgt, sind Landnutzungsänderungen im Einzugsgebiet (z. B. Aufforstung), welche den Oberflächenabfluss reduzieren oder dem Rückhalt von Sedimenten dienen. Die Erhöhung der Biomasse im Boden trägt

nicht nur zu einer Verbesserung der Infiltrationseigenschaften und der Speicherkapazität des Bodens bei, sie dient auch als Kohlenstoffsenke (Ceschia et al., 2010) und führt zu einer wesentlichen stofflichen Entlastung der Gewässer.

Synergien in der Siedlungswasserwirtschaft sind primär im Zusammenhang mit Anstrengungen zur Kostenreduktion für den Energieeinsatz sowie funktionellen Optimierungen von verfahrenstechnischen und konzeptionellen Ansätzen zu erwarten. Im Bereich der Wasserkraft können sich durch die Mehrfachnutzung von Speicherbecken – neben energetischer Nutzung auch Pufferung von Hochwässern oder Aufhöhung von Niederwasser – Synergieeffekte, wie z. B. Verminderung von Schäden durch extreme Niederwässer oder Verringerung von Kosten für Hochwasserschutzbauen, ergeben. Ein weiterer Ausbau der Wasserkraft kann aber auch negative Einflüsse auf die Ökologie und Flussmorphologie bewirken. Beispiele dafür sind eine Beeinträchtigung der Gewässerstrukturen und der Habitatqualität (unter anderem Veränderung von Sohlsubstrat, Temperaturverteilungen und hydrodynamische Bedingungen) oder ein negativer Einfluss auf die Fischpassierbarkeit und Feststoffdurchgängigkeit. Durch Abflussminima aufgrund klimatischer Veränderungen – auch wenn diese zeitlich begrenzt oder nur lokal wirksam sind – kann es zu Nutzungskonflikten kommen (z. B. Wasserbedarf für Bewässerung oder Kühlung). Neben der mengenmäßigen Verfügbarkeit können sich die Entnahmen auch negativ auf die Wassertemperaturen auswirken und somit ökologische Folgen haben.

Synergieeffekte können sich durch die Adaption von Sperren, Rückhaltebauten und Wehranlagen in Hinblick auf ein verbessertes Sedimentmanagement, z. B. dosierte Weitergabe von Geschiebe durch Veränderungen an den Bauwerken, ergeben. Einerseits kann durch die Räumung von Sperren die Deponierung des Materials minimiert werden, andererseits wird das Geschiebekontinuum, zumindest teilweise, wieder hergestellt, was sich positiv auf die Gewässermorphologie und die Ökologie im Unterwasser auswirken kann.

2.5 Naturschutz, natürliche Ökosysteme und Biodiversität

2.5 Nature conservation, natural ecosystems and biodiversity

Natürliche Ökosysteme und die Vielfalt der Lebewesen, die sie beherbergen, sowie ihre Leistungen, sind von grundlegender Bedeutung für Gesellschaft und Wirtschaft (CEC, 2007). Der Klimawandel wird über seine Folgen auf natürliche Ökosysteme, Artenvielfalt und die Ökosystemdienstleistungen Gesellschaft und Wirtschaft beeinflussen. Intakte Ökosysteme sind durch den Klimawandel besser in der Lage, die Ökosystemdienstleistungen aufrechtzuerhalten, von denen Wohlstand und Wohlergehen abhängen. Die Bewahrung der natürlichen Lebensgrundlagen unter veränderten klimatischen Rahmenbedingungen ist eine Voraussetzung für den Erfolg von Anpassungsmaßnahmen in anderen Aktivitätsfeldern.

Natürliche Ökosysteme und Biodiversität werden auf vielfältige Weise durch den Klimawandel beeinflusst (Zebisch et al., 2005) (vgl. Band 2, Kapitel 3). Arten haben sich an die vorherrschenden Umweltbedingungen ihres Lebensraumes, inklusive ihrer üblichen Variabilität, im Rahmen der Evolution angepasst. Das Klima ist wesentlicher Faktor für die globale Verteilung von Ökosystemen und Arten. Ändert sich das Klima, passen sich Arten, soweit möglich, entweder biologisch an oder migrieren in neue Lebensräume. Das ist an sich ein natürlicher Vorgang; entscheidend ist jedoch, inwieweit sich Arten und Lebensräume an den derzeitigen raschen Klimawandel anpassen können, da die Wanderungs- und Anpassungsgeschwindigkeit beschränkt ist. Beim Überschreiten von Schwellenwerten ist zudem davon auszugehen, dass sich Lebensgemeinschaften massiv verändern, etwa durch stark erhöhte Mortalität von Bäumen in Wäldern, oder in Moorlebensräumen als Folge eines zu trocken-warmen Klimas.

Die biologische Vielfalt ist nicht nur durch den Klimawandel, sondern durch viele andere globale, regionale und lokale Veränderungen bedroht. Negativ können sich etwa die Einbringung gebietsfremder, invasiver Arten, die Deposition von Schadstoffen, die Zerstörung von Lebensräumen durch Bautätigkeit für Siedlungen, Gewerbe, Industrie oder Tourismus, die Wassernutzung sowie Land- und Forstwirtschaft auswirken. Maßnahmen in anderen Sektoren haben daher Folgen für Naturschutz, Ökosysteme und Biodiversität, sowohl indirekt (über den Klimawandel), als auch direkt, etwa durch Landnutzung. THG-Minderungsmaßnahmen in anderen Sektoren stellen somit häufig auch Adaptionsmaßnahmen für den Bereich Naturschutz und Biodiversität dar.

Es kann auch zu Trade-offs zwischen Klimaschutzmaßnahmen und dem Schutz der Biodiversität kommen. Konflikte zwischen Klimaschutz und Erhaltung der Biodiversität treten z. B. im Bereich erneuerbarer Energien auf. Ein weiterer Ausbau der Wasserkraft kann zu einer Verringerung der biologischen Vielfalt in Fließgewässern führen. Eine Zunahme der Flächeninanspruchnahme für den Anbau von Energiepflanzen oder eine intensivere Holznutzung der Wälder kann ihre Funktion als Kohlenstoffsenke vermindern und Auswirkungen auf die Biodiversität haben. Durch frühzeitiges Erkennen möglicher Konflikte zwischen Klima- und Biodiversitätsschutz

ist es möglich, das vorhandene Potenzial für Synergien bestmöglich zu nutzen (SCNAT, 2008).

Seit Mitte der 1990er Jahre wurde die Erforschung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Biodiversität Österreichs intensiviert. Mittlerweile liegen die Ergebnisse mehrerer wichtiger Fallstudien vor, etwa in Bezug auf die Auswirkungen des Klimawandels auf die Veränderung der Waldgrenze (Dullinger et al., 2005), die Flora der Alpengipfel (Gottfried et al., 2012; Pauli et al., 2012), die Mortalität von Waldbäumen (Lexer et al., 2001), die Fischfauna (Melcher et al., 2010), auf Arten, die weltweit ausschließlich in Österreich vorkommen, d. h. so genannte Endemiten, (Dirnböck et al., 2011) und auf ausgewählte problematische Neobiota, also Arten, die ursprünglich nicht einheimisch waren und nach der Entdeckung Amerikas eingeschleppt wurden (Neobiota; Essl, 2007; Essl et al., 2010; Kleinbauer et al., 2010a,b). Ein Überblick des Kenntnisstandes zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Tierwelt, insbesondere im Alpenraum, wurde von Kromp-Kolb (2003) vorgelegt. Darüber hinaus entwickelten und erprobten Rüdisser et al. (2011) eine Methodik, um flächendeckend für Österreich Auswirkungen von Klima- und Landnutzungsszenarien auf ausgewählte Biodiversitätsindikatoren wie z. B. Gefäßpflanzen und Naturdistanz zu berechnen.

Im Rahmen der österreichischen Anpassungsstrategie an den Klimawandel wurde der Status quo des Wissens- und Handlungsbedarfs zu Anpassungs- und THG-Minderungsmaßnahmen im Bereich „Natürliche Ökosysteme und Biodiversität" dargestellt (Haas et al., 2010). Der Forschungsstand zum Zusammenhang von Klimawandel und Biodiversität in Mitteleuropa wurde kürzlich von Ellwanger et al. (2013) zusammengefasst.

Im Unterschied zu den Sektoren Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Wasserwirtschaft sind im Bereich Naturschutz und Biodiversität THG-Minderungsmaßnahmen immer in ihrem systemischen Zusammenhang zu sehen; sie werden in Abschnitt behandelt.

2.5.1 Anpassung im Bereich Naturschutz, natürliche Ökosysteme und Biodiversität

Dieser Abschnitt diskutiert Handlungsmöglichkeiten, die darauf abzielen, Gefährdungsfaktoren, die auf die Biodiversität einwirken (vgl. Band 2, Kapitel 3), zu reduzieren und dadurch Ökosystemdienstleistungen aufrechtzuerhalten. Intakte Ökosysteme sind gegenüber dem Klimawandel unempfindlicher und daher besser in der Lage, eine hohe Artenvielfalt zu beherbergen und Ökosystemdienstleistungen aufrechtzuerhalten.

Was heißt „Anpassung an den Klimawandel" im Bereich Biodiversität?

Anpassung umfasst Aktivitäten zur Verringerung der Empfindlichkeit natürlicher und menschlicher Systeme gegenüber den Auswirkungen des Klimawandels. Ziel ist es, Schäden des Klimawandels zu vermeiden oder zu verringern, was auf unterschiedliche Weise erfolgen kann. In vom Menschen beeinflussten Systemen können Anpassungsprozesse geplant, entweder vorbeugend oder in Reaktion auf Schadensereignisse, erfolgen. In natürlichen Systemen kommt jedoch der autonomen, also der ungeplanten, spontan stattfindenden Anpassung eine große Bedeutung zu. Die Natur reagiert seit jeher dynamisch auf die sich stets verändernden Rahmenbedingungen. Diese Dynamik gilt es zu ermöglichen und zu fördern. Der Mensch kann die Anpassung in natürlichen Systemen durch geeignete Maßnahmen unterstützen. Dazu gehören vorbereitende Handlungen, die die Wissensgrundlagen für Anpassungsmaßnahmen verbessern. Andererseits fallen darunter auch Tätigkeiten, die direkt zu gewünschten Effekten führen. Da Anpassung auf der gesamten Fläche erfolgen sollte, werden viele naturschutzrelevante Maßnahmen von anderen Akteuren als jenen, die unmittelbar mit dem Naturschutz betraut sind, umgesetzt (z. B. durch die Landwirtschaft oder im Zuge von Maßnahmen zur Vorsorge gegenüber Naturgefahren).

Grenzen der Anpassung im Bereich Biodiversität und Ökosysteme

Klimaschutz und Klimawandelanpassung stehen in engem Zusammenhang mit der Erhaltung der Biodiversität; Klimaschutz und Erhaltung der Biodiversität werden sogar vielfach als gleichwertige Ziele angesehen (CBD, 2003). Eine Vielzahl von ökosystembasierten Anpassungsmaßnahmen bieten Synergien mit Klimaschutzmaßnahmen (CBD, 2003; EC, 2007), entweder durch eine Reduktion von THG-Emissionen oder durch die Erhöhung der Speicherung von Kohlenstoff in Ökosystemen. Großes Augenmerk ist dabei auf die Bewirtschaftung der Landökosysteme zu legen (Abschnitt 2). Österreichs Fläche wird maßgeblich durch die Land- und Forstwirtschaft beeinflusst; die biologische Vielfalt wird auf diesen Flächen stark von der Intensität der Bewirtschaftung geprägt. Die Extensivierung der landwirtschaftlichen Nutzung bietet ein Synergiepotenzial für den Klimaschutz und die Erhaltung der Biodiversität.

Zusätzliche Potenziale ergeben sich durch eine differenzierte Nutzung der Wälder als Kohlenstoffsenken, insbesondere in Gebieten mit weniger produktiven und ökonomisch schlecht

nutzbaren Wäldern und durch die Wiederherstellung von trockengelegten Mooren.

Neben den Synergiepotenzialen gibt es auch Konfliktfelder. Konflikte zwischen Klimaschutz und Erhaltung der Biodiversität bestehen vor allem im Bereich erneuerbare Energien, etwa bei Wasserkraft und Bioenergie (z. B. Anlage von Kurzumtriebswäldern, Anbau von nachwachsenden Energieträgern wie Elefantengras auf naturschutzfachlich wertvollen Standorten). Eine umfassende globale Vereinbarung zur Erhaltung der Kohlenstoffvorräte in terrestrischen Ökosystemen (z. B. durch Aktivitäten wie REDD+[8]), welche die bisherigen Regelungen zu Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft in der internationalen Klimapolitik ersetzen soll, könnte zur Abmilderung derartiger Konflikte beitragen.

Erhöhung der Resilienz klimasensitiver Arten und Lebensräume

Die Resilienz sensitiver Arten und Lebensräume gegenüber dem Klimawandel kann gestärkt werden, indem andere – „konventionelle" – negative Einflüsse wie Lebensraumzerstörung, Eutrophierung oder Entwässerung minimiert werden. Dies ist besonders effektiv, wenn negativen Effekte vermindert werden, die durch den Klimawandel verstärkt werden, wie z. B. die Entwässerung von Feuchtgebieten. Erforscht und modellhaft umgesetzt können auch Anpassungsmaßnahmen werden, die eine dynamische Anpassung von Lebensräumen an veränderte klimatische Bedingungen unter Wahrung ihres Naturschutzwertes ermöglichen, z. B. durch eine Veränderung der Baumartenzusammensetzung in Wäldern.

Anwendung naturschutzkonformer Leitlinien beim Ausbau nachwachsender Rohstoffe

Eine umfassende Berücksichtigung von Naturschutzkriterien auf Basis festgelegter, national einheitlicher Kriterien bei der Nutzung der Potenziale für die Produktion nachwachsender Rohstoffe kann negative Auswirkungen auf Ökosysteme und Biodiversität reduzieren. Die Prüfung direkter und indirekter Landnutzungsänderungen, etwa bei der Produktion und / oder dem Import von Bioenergie auf Basis von Standards, die gleichwertig sind wie jene in Österreich, ist ein Beispiel dafür. Dies gilt auch für den Ausbau von Windkraft, Photovoltaik und Wasserkraft.

Früherkennung und Management von Neobiota, die vom Klimawandel profitieren

In vielen Fällen profitieren invasive Neobiota (neu einwandernde Arten) vom Klimawandel (Walther et al., 2009), wobei auch Lebensräume und Regionen, die heute aus klimatischen Gründen ungeeignet sind, zukünftig besiedelbar werden. Es ist zu erwarten, dass sie beim durch den Klimawandel bedingten Umbau von Lebensräumen eine wichtige Rolle einnehmen werden. In Summe führen diese Entwicklungen dazu, dass invasive Neobiota wie die Robinie, der Japanische Staudenknöterich, der Götterbaum oder das Drüsige Springkraut künftig eine deutlich größere Gefährdung für die Biodiversität, aber auch für menschliche Aktivitäten und die Gesundheit, sein werden als sie es heute sind (z. B. Ambrosie, vgl. Band 2, Kapitel 3). Bei häufigen und weit verbreiteten invasiven Arten sind Bekämpfungsmöglichkeiten und Erfolgsaussicht meist sehr limitiert. Effiziente Maßnahmen sind daher vor allem Prävention und Früherkennung; rasches Handeln gilt als Erfolgskriterium. Die konsequente Unterstützung und Umsetzung des jüngst vorgelegten Entwurfs zu einer EU-Strategie zu invasiven Arten[9] ist ebenfalls wesentlich.

Gestaltung öffentlicher und privater Grünflächen in Siedlungen

Stark versiegelte bebaute Gebiete weisen ein besonders heißes Lokalklima mit geringer Luftfeuchte auf (Stadteffekt); dies kann durch folgende Maßnahmen reduziert werden (vgl. Drlik & Muhar 2010):

- Erhaltung von naturnahen Grünflächen im urbanen Raum, z. B. in steilen Hanglagen, an städtischen Gewässern, in wenig genutzten städtischen Restflächen;
- Naturschutzgemäße Gestaltung von Grünflächen, ungenutzten Brachen, etc. als Rückzugsräume (temporär auf Bauerwartungsland, aber auch durch Zulassen von Stadtwildnis im öffentlichen Grün – z. B. Ökopark Linz[10]);
- Entsiegelung von Flächen innerhalb von Siedlungen – führt auch zu einer Entlastung des Kanalsystems durch erhöhte Versickerung im Boden;
- Begrünung von Dächern und Fassaden;

[8] REDD+ ist ein in der Klimarahmenkonvention der UN-Vertragsstaatengemeinschaft entwickelter Mechanismus, der finanzielle Anreize für eine Reduktion von Emissionen aus der Entwaldung und der Schädigung von Wäldern bietet. Gefördert wird eine nachhaltige Waldbewirtschaftung und Erhalt der biologischen Vielfalt.

[9] http://ec.europa.eu/environment/nature/invasivealien/

[10] www.linz.at/umwelt/4352.asp

- Ausweitung des Baumbestands im öffentlichen Bereich, z. B. entlang städtischer Straßen;
- Bevorzugte Auswahl von einheimischen hitze- und trockenheitsresistenten Gehölzen für die Anpflanzung;
- Förderung naturnaher Gestaltung von Gärten und des öffentlichen Grüns;
- Zulassung von Spontangrün auf wenig oder nicht genutzten Flächen.

Stärkung gefährdeter, vom Klimawandel stark bedrohter Arten

Vom Klimawandel besonders gefährdete Arten können durch gezielte Schutzprojekte gestärkt werden. Die dabei nötigen Maßnahmen sind artspezifisch und bedürfen mitunter Begleituntersuchungen, um die Effizienz der Maßnahmen zu überprüfen und ggf. zu verbessern. Die Bandbreite wichtiger Aktivitäten reicht von der Pflege und / oder Wiederherstellung von Lebensräumen bis zu gezielter Populationsstützung (z. B. Ausbringung von ex situ vermehrten Individuen). Beim Fehlen von Alternativen und nach umfassender Abwägung möglicher Risiken könnte auch eine Unterstützung der Migration durch Translokation gefährdeter Arten oder Populationen hilfreich sein.

Anpassungsmaßnahmen für Schutzgebiete

Die Bedeutung von Schutzgebieten für die Erhaltung der Biodiversität ist durch internationale Konventionen, wie das Übereinkommen zur biologischen Vielfalt der Vereinten Nationen oder die Berner Konvention, anerkannt (z. B. Lovejoy, 2006; WDPA, 2012). Der Klimawandel führt zu erheblichen Konsequenzen auch im Hinblick auf die Verteilung und den Erhaltungszustand vieler Arten und Lebensräume (z. B. Aráujo et al., 2004; Lovejoy und Hannah, 2005). Aufgrund der individuellen Reaktion der Arten auf den Klimawandel wird es auch zu einer Veränderung der Struktur und Zusammensetzung von Artengemeinschaften in Schutzgebieten kommen (z. B. Normand et al., 2007; Pompe et al., 2010). Aus diesen Gründen sind Verbesserungen in der Vernetzung von Schutzgebieten unter Integration von Pufferzonen und Korridoren sowie Änderungen im Schutzgebietsmanagement (vor allem Verhinderung negativer Eingriffe, Restaurierung gestörter Ökosysteme) sinnvoll.

Verbesserung der Einbettung und Vernetzung von Schutzgebieten und Lebensräumen

Den rechtlich verordneten Schutzgebieten kommt eine zentrale Rolle als Instrument des Naturschutzes zu. Der Wert von Schutzgebieten, aber auch von Lebensräumen außerhalb von Schutzgebieten, hängt stark von ihrer räumlichen Anordnung, dem Vernetzungsgrad der Lebensräume und Schutzgebiete untereinander und von der Einbindung in die umgebende Landschaft ab. Neben ihrer Fläche bestimmen vor allem diese Faktoren maßgeblich die Überlebenswahrscheinlichkeit von Arten, sowie die Erhaltung der Schutzfunktion von Schutzgebieten in einem sich wandelndem Klima. Besonders die effektive Vernetzung spielt eine große Rolle; sie kann durch folgende Maßnahmen erhöht werden:

- Schutzgebiete sind traditionell vor allem in Räumen mit niedrigem Nutzungsdruck angesiedelt. Für eine Vernetzung der Schutzgebiete sind daher auch ausreichende Schutzgebiete in stark genutzten Gebieten, in den Alpen z. B. in Talräumen, wesentlich;
- Die Verbindung von Lebensräumen und Schutzgebieten durch geeignete Strukturen kann ein effektives Netzwerk von Habitatkorridoren schaffen. Für die Wirksamkeit von Korridoren ist es wichtig, dass diese für die Zielarten gut nutzbar sind, z. B. durch deren Abstände und Strukturen, und dass sie gleichartige Schutzgebiete verbinden;
- Korridore entlang von Klima- und Höhengradienten sind besonders zur Vernetzung geeignet;
- Die Einbindung von Schutzgebieten in die Landschaft kann über angepasste Nutzung der angrenzenden Pufferstreifen optimiert werden;
- Die Reduktion anderer Beeinträchtigungen von Schutzgebieten durch menschliche Eingriffe kann ihre Wirksamkeit verbessern.

Anpassungen im Schutzgebietsmanagement

Das Management der Schutzgebiete stellt einen entscheidenden Faktor dar, um die Schutzziele in den einzelnen Gebieten bzw. im Schutzgebietssystem insgesamt zu erreichen. Durch den Klimawandel wird diese Aufgabe noch wichtiger. Folgende Ziele für das Management sind im Hinblick auf den Klimawandel bedeutsam (Huntley, 2007; Lovejoy und Hannah, 2005):

- Schutzgebietssysteme können selbst einen erheblichen Beitrag zur Begrenzung des Klimawandels leisten, etwa durch Schutz bzw. Wiederherstellung von Kohlenstoff-

senken, wie z. B. intakten Mooren, durch Wiedervernässung geschädigter Moore oder Moorböden, oder durch Erhaltung und Entwicklung alter Wälder mit ungestörter Bodenentwicklung;
- Die Verringerung bestehender Beeinträchtigungen oder Bedrohungen von Arten und Lebensräumen, die unabhängig vom Klimawandel bestehen, aber auch in Schutzgebieten wirksam sind, kann einen wichtigen Beitrag leisten. Darunter fällt z. B. die Beseitigung negativer Einflüsse, wie Nährstoffeinträge oder Eingriffe in den Wasserhaushalt (Entwässerung, etc.);
- Die Vergrößerung geeigneter Habitate für die in einem Gebiet jeweils zu schützenden Arten, die Vergrößerung der Flächen schutzbedürftiger Lebensräume sowie die Verbesserung ihrer Qualität kann ihre Schutzwirkung unter Klimawandel verbessern;
- Kontrolle bzw. Überwachung von invasiven Neobiota;
- Die Schaffung von ausreichend großen, ausgewogenen, im gesamten Schutzgebietssystem verteilten Referenzflächen zur Beobachtung der Auswirkungen des Klimawandels unter möglichst wenig vom Menschen beeinflussten Bedingungen;
- Verstärkte Berücksichtigung der zu erwartenden Auswirkungen des Klimawandels bei der Managementplanung, d. h. insbesondere bei Festlegung langfristiger Ziele und Maßnahmen sowie ihrer Überprüfung.

Berücksichtigung von Biodiversität in Klima- und Nachhaltigkeitspolitik

Sowohl auf Bundes-, als auch auf Länderebene wurden in Österreich Nachhaltigkeitsstrategien definiert (z. B. ÖSTRAT, 2010). In diesen Strategien nimmt der Klimaschutz eine prominente Rolle ein, ist aber häufig nicht mit dem Schutz der Biodiversität oder dem Erhalt von Ökosystemleistungen gekoppelt. Darüber hinaus existiert eine Reihe von politischen Anreizsystemen, insbesondere in der Land- und Forstwirtschaft sowie im Bereich erneuerbarer Energien, die den Zusammenhang von Klima- und Biodiversitätsschutz aus naturschutzbiologischer Sicht nur unzureichend berücksichtigen. Dies könnte durch vermehrte Berücksichtigung folgender Ziele geschehen:

- Weiterentwicklung der Nachhaltigkeitsstrategien durch vermehrte Förderung von Synergien und Minderung von Konflikten zwischen Klima- und Biodiversitätsschutz auf Bundes- und Länderebene;
- Zurücknahme von Anreizmaßnahmen in Energie- und Landwirtschaftspolitik, welche negative Auswirkungen auf Biodiversität und Naturschutz haben („perverse incentives").
- Stärkere Integration von verbindlichen Kriterien des Biodiversitäts- und Klimaschutzes in land- und forstwirtschaftlichen Anreizsystemen. Dies bedeutet u. a., dass die anzuwendenden Rechtsvorschriften unter dem Ziel einer klimaverträglichen Landnutzung so überarbeitet bzw. ergänzt werden, dass klimaschädigende Tätigkeiten in das Repertoire von Cross Compliance-Vorgaben für landwirtschaftliche Förderungen aufgenommen werden.

2.5.2 Synergien zwischen THG-Minderung und Anpassung

Viele Anpassungsmaßnahmen im Bereich Naturschutz, Biodiversität und Ökosysteme stehen in einem engen Zusammenhang mit Klimaschutzmaßnahmen, da sie THG-Emissionen verringern oder zu einer CO_2-Sequestrierung führen können (z. B. Schutz alter Wälder und von Feuchtgebieten). Derartige Maßnahmen weisen einen Mehrfachnutzen mit hohem Synergiepotenzial für eine Anpassung an den Klimawandel auf und leisten zusätzlich einen Beitrag zur THG-Minderung. Viele dieser Maßnahmen sind ökonomisch vergleichsweise günstig und können beträchtliche positive Wirkungen entfalten („no regret"-Maßnahmen).

Synergien von kohlenstoffspeichernden Bewirtschaftungsformen und Naturschutz

Vor allem extensiv genutzte land- und forstwirtschaftliche Böden speichern große Mengen Kohlenstoff im Humus, in der Streuauflage oder als Torf. Der Bodenkohlenstoffgehalt wird durch die Art und Intensität der Landnutzung beeinflusst, wobei Ab- und Aufbau von Bodenkohlenstoff über längere Zeiträume erfolgen (Abbildung 2.8). Durch geeignete Gestaltung der land- und forstwirtschaftlichen Nutzung kann die Freisetzung von Bodenkohlenstoff (besonders in sehr kohlenstoffhältigen Böden wie Torfböden) reduziert oder verhindert und der Anstieg des Bodenkohlenstoffgehalts gefördert werden. Der Bodenkohlenstoffgehalt kann vor allem auch durch ein Rückgängigmachen von Eingriffen in den Wasserhaushalt erhöht werden. (vgl. Band 2, Kapitel 2). Derartige Maßnahmen haben auch positive Wirkungen im Sinne des Naturschutzes.

Folgende Maßnahmen sind hervorzuheben, wobei jeweils standortspezifische Faktoren zu beachten sind:

- Standörtlich angepasste, extensive Nutzung von Feuchtgebieten zur Verhinderung des Kohlenstoffverlusts aus Torfböden (z. B. Moorrenaturierungsprojekt der Österreichischen Bundesforste im Salzkammergut[11]): Rückführung von Ackerland in Grünland und Extensivierung von Intensivgrünland, Anhebung des Grundwasserspiegels auf entwässerten Böden;
- Bodenkohlenstoffaufbau auf ackerbaulich genützten Böden: wenig tiefgreifende Bodenbearbeitung (z. B. grubbern statt pflügen), Anbau von Gründüngung und Mulchsaat, etc. (Hülsbergen, 2011; Smith et al., 2007);
- Verhinderung von Mineralisierung und Abbau von Bodenkohlenstoff im Rahmen der forstwirtschaftlichen Nutzung durch Wahl geeigneter Nutzungsformen.

Erhöhung der THG-Speicherfähigkeit von Feuchtgebieten

Unter den naturnahen Lebensräumen Österreichs speichern Feuchtgebiete pro Flächeneinheit die größte Menge an Kohlenstoff. Feuchtgebiete speichern Kohlenstoff überwiegend im Boden, unter anderem als Torf. Viele Feuchtgebiete unterliegen jedoch einer wirtschaftlichen Nutzung, die Einfluss auf die gespeicherte Kohlenstoffmenge und auf die Rate der Aufnahme bzw. Freisetzung von Kohlenstoff und anderen Treibhausgasen hat. Besonders bei Feuchtgebieten mit sehr hohen flächenbezogenen Kohlenstoffvorräten (z. B. Mooren) führt eine nicht-nachhaltige Nutzung zu hohen THG-Emissionen. Durch Änderungen der Nutzung können auf einer relativ kleinen Fläche – weitgehend intakte Moore nehmen in Österreich eine Fläche von etwa 17–21 000 ha ein (Grünig und Steiner, 2010) – Maßnahmen umgesetzt werden, die einen hohen und kostengünstigen Beitrag zu Adaption und THG-Minderung leisten. Dazu zählen unter anderem folgende Maßnahmen:

- Keine weiteren Entwässerungen von Feuchtgebieten;
- Gezielte Wiedervernässung entwässerter Feuchtgebiete und Anpassung der Nutzung an die standörtlichen Voraussetzungen;
- Falls eine Wiedervernässung unmöglich ist, können durch eine Rückführung von Ackerland in Grünland die THG-Emissionen durch den biologischen Abbau von Torf im Boden deutlich verringert werden.

Als Anreiz für die Durchführung derartiger Maßnahmen kann eine Abgeltung von Ertragsverlusten und Bewirtschaftungseinschränkungen unter Berücksichtigung des jeweiligen Beitrags zum Klimaschutz dienen, etwa in Form einer Abgeltung der Ökosystemdienstleistung „vergrößerte Speicherung von Treibhausgasen".

Natur- und Senkenschutz durch differenzierte Waldnutzung

Wälder können sehr unterschiedlich bewirtschaftet werden (Abschnitt 2.3). So können insbesondere in abgelegenen Regionen Wälder vermehrt als Kohlenstoffspeicher genutzt werden, indem sie nur noch minimal bewirtschaftet und als Waldreservate ausgeschieden werden. Dies würde sowohl die Kohlenstoffspeicherung erhöhen, als auch naturnahe, artenrei-

[11] http://www.bundesforste.at/index.php?id=990

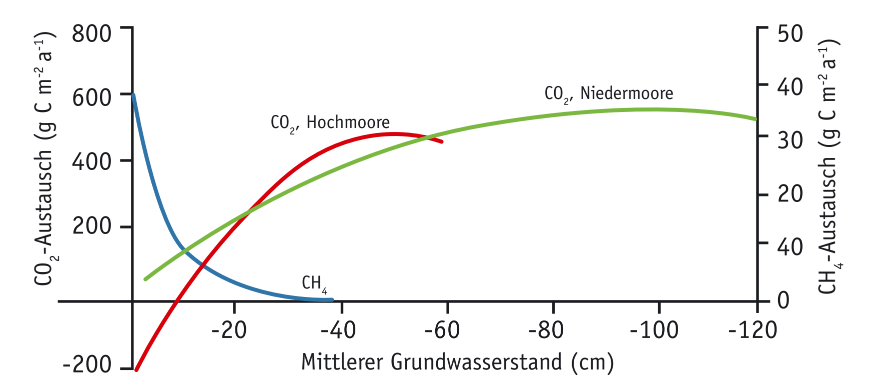


Abbildung 2.8 Freisetzung von Kohlendioxid (CO_2, linke Achse) und Methan (CH_4, rechte Achse) aus Moorböden in Abhängigkeit vom Grundwasserstand. Bei einem Grundwasserstand im Bereich von 10 cm unter Flur ist die Freisetzung der beiden Gase am geringsten. Quelle: Verändert nach Daten von Drösler (2005) und Höper (2007)

Figure 2.8 Emissions of carbon dioxide (CO_2, left axis) and methane (CH_4, right axis) from peat bog soils depending on the groundwater table. Emissions are smallest when the ground water table is 10 cm below ground. Source: redrawn based on data from Drösler (2005) and Höper (2007)

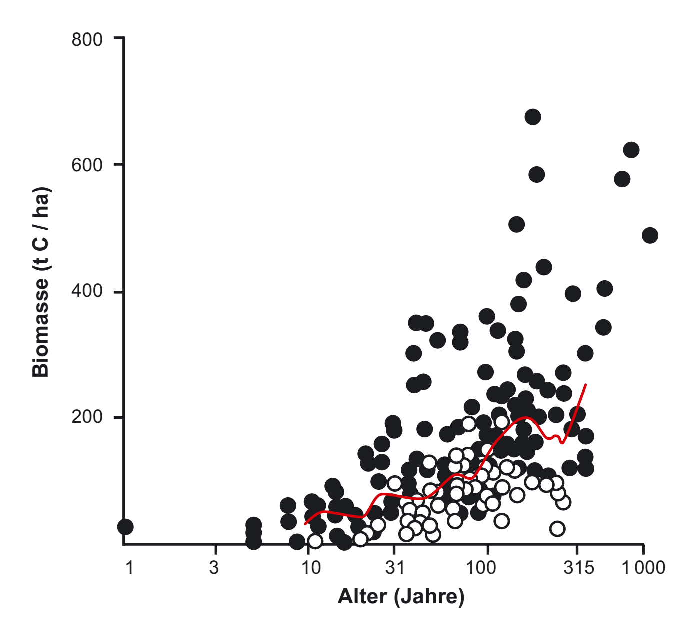


Abbildung 2.9 Kohlenstoffvorräte in der Biomasse in Abhängigkeit vom Bestandsalter in temperaten (schwarze Punkte) und borealen Wäldern (weiße Punkte). Quelle: verändert nach Freibauer et al. (2009)

Figure 2.9 Carbon storage in biomass depending on stand age in temperate (black dots) and boreal (white dots) forests. Source: Redrawn after Freibauer et al. (2009)

che Wälder schaffen (Abbildung 2.9). Für die Kohlenstoffspeicherung im Wald ist das Bestandsalter maßgeblich: Die gespeicherte Kohlenstoffmenge nimmt mehrere hundert Jahre lang zu und steigt auch noch bei einem hohen Bestandsalter, wenngleich die absoluten jährlichen Zuwächse in reifen Beständen abnehmen (Freibauer et al., 2009). Alte Wälder sind damit effektivere Kohlenstoffspeicher als junge. Die mittlere Verweildauer des Kohlenstoffs beträgt in ungenutzten Wäldern etwa 1 000 Jahre (Luyssaert et al., 2008). Dies liegt weit jenseits forstlicher Umtriebszeiten, die meist 70 bis 120 Jahre betragen.

Abgeltung von Ökosystemleistungen bei nachhaltiger Landnutzung

Von intakten Ökosystemen werden zahlreiche Leistungen erbracht, die für unsere Gesellschaft unerlässlich sind, für die jedoch kein Markt vorhanden ist. Sie werden daher kostenlos konsumiert, ebenso wie die Schädigung oder Erhaltung dieser Ökosystemleistungen keine finanziellen Auswirkungen haben. Durch den Klimawandel werden wichtige Ökosystemleistungen verstärkt gefährdet werden, andere, wie z. B. Kohlenstoffspeicherung oder Hochwasserschutz, werden noch wichtiger werden. Zwischen intakten Lebensräumen und der Qualität und Quantität von Ökosystemleistungen besteht ein enger Zusammenhang.

Eine Quantifizierung, Bewertung und Abgeltung von Ökosystemleistungen, vor allem im Zuge der Landbewirtschaftung, kann Anreize schaffen, Ökosystemleistungen zu erhalten bzw. zu verbessern. Dafür sind Konfliktabwägungen und Prioritätensetzungen unter den Gesichtspunkten Klimawandel, Bewahrung von Biodiversität und Risikovorsorge erforderlich. Die Abgeltung von Ökosystemleistungen kann z. B. über das Agrarfördersystem erfolgen. Voraussetzung dafür ist ein integriertes Monitoring der durch die biologische Vielfalt bzw. durch Ökosysteme erbrachten Ökosystemleistungen. Erste Ansätze dazu bieten das vom Lebensministerium entwickelte Monitoringsystem zur Vielfalt der belebten Umwelt (MOBI-e, 2006; Rüdisser et al., 2011) und das Inventar von Ökosystemleistungen im Bereich Landwirtschaft (Götzl et al., 2011d). Beide Systeme wurden allerdings bisher nur in einem beschränkten Ausmaß implementiert. Die monetäre Bewertung von Ökosystemen, Biodiversität und Ökosystemleistungen wird allerdings auch kritisch gesehen, unter anderem, wenn damit ihre Bedeutung für die Gesellschaft auf deren Geldwert reduziert wird, was nicht problemadäquat wäre (Lo und Spash, 2013; Spash, 2011).

Ein derartiges Monitoringsystem wird auch in einer Reihe europäischer Staaten entwickelt (Haines-Young und Potschin, 2011). Abweichend vom ursprünglichen Konzept der Ökosystemleistungsdebatte (MEA, 2003) werden dabei primär die sogenannten finalen Ökosystemleistungen erfasst. Es sind dies Ökosystemgüter und -dienstleistungen, die vom Menschen direkt genossen, konsumiert oder genutzt werden (Final Ecosystem Goods and Services, FEGS) und so direkt zur Wohlfahrt beitragen (Boyd und Banzhaf, 2007). Das von der Europäischen Umweltagentur (EEA) entwickelte Klassifizierungssystem (Common International Classification of Ecosystem Goods and Services, CICES; vgl. Haines-Young und Potschin, 2011) lässt bei der nationalen Umsetzung relativ große Spielräume für länderspezifische Gegebenheiten zu. Das Monitoring von Ökosystemleistungen ermöglicht nicht nur, Auswirkungen des Klimawandels auf Ökosystemleistungen anhand von Szenarien zu analysieren und damit eine sehr gute Basis für THG-Minderungsmaßnahmen zu entwickeln, sondern bietet darüber hinaus auch die Möglichkeit, die schwierig zu fassenden indirekten Wirkungen der Klimafolgen zu beachten.

2.6 Kosten und Potenziale
2.6 Costs and potentials

2.6.1 Kosten und Potenziale der THG-Reduktion

Generell spielen bei der Implementierung von Klimaschutz- und Anpassungsmaßnahmen die entstehenden Kosten eine große Rolle. Die Schadenskosten des Klimawandels („Social Costs of Carbon“) sind ein wichtiger Maßstab bei der Bewertung von Maßnahmen zur THG-Emissionsreduktion. Diese werden im AAR14, Band 3, Kapitel 1 behandelt. In diesem Kapitel wird in weiterer Folge ausschließlich auf Kosten und Potenziale von Bioenergie eingegangen.

Kosten und Potenziale von Bioenergie

Das ökonomische Produktionspotenzial von Biomasse und Bioenergie hängt vor allem von den verfügbaren Flächen, den erzielbaren Pflanzenerträgen, den verfügbaren Produktions- und Prozesstechniken, den Produktions- und Prozesskosten entlang der Wertschöpfungskette sowie den Opportunitätskosten ab. Laut Stürmer et al. (2013) setzen, falls die Nutzung von Bioenergie nicht subventioniert wird, die Preise von fossilen Energieträgern Obergrenzen für die Preise von Bioenergieträgern. Die Studie analysiert vor allem die Produktions-, Prozess- und Opportunitätskosten der landwirtschaftlichen Biomasse und Bioenergieproduktion in Österreich, wobei auch direkte und indirekte Effekte der Biomasseproduktion, wie z. B. der Rückgang der Lebensmittelproduktion, die Veränderungen der Bewirtschaftungsintensität und die Wechselwirkungen mit dem Österreichischen Agrarumweltprogramm, untersucht werden. Die Studie zeigt, dass ein massiver Ausbau der heimischen Biomasse- und Bioenergieproduktion signifikante Kosten sowie höhere Landnutzungsintensitäten zur Folge hätte.

Die Produktionskosten für Biomasse zur Stromerzeugung in österreichischen Biogasanlagen betragen laut Stürmer et al. (2010, 2011a) etwa 16 Cent/kWh, was deutlich über dem derzeitigen Marktpreis von Strom (5–6 Cent/kWh) liegt. Ansätze zur Kostenreduktion bestehen laut Stürmer et al. (2011b) in der Verringerung der Substratbereitstellungs-, Logistik- und Prozesskosten. Die CO_2-Vermeidungskosten, also die anteiligen Investitions- und Betriebskosten von Biogasanlagen pro Tonne eingespartem CO_2, bewegen sich in einem vertretbaren Rahmen, nämlich bei 20–40 € pro Tonne CO_2, was deutlich unter den Schadenskosten liegt. Diese Kostenstruktur ist allerdings nur beim Einsatz von Rohstoffen aus intensiver Maisproduktion zu erzielen. Die Vermeidung von Maisfruchtfolgen ohne Fruchtwechsel erhöht die Kosten um bis zu 29 %. Das Projekt „EU Agro Biogas“ ermittelte Vermeidungskosten zwischen 3,3 und 67,0 €/t CO_2-Äq. je nach Anlagenart und verwendetem Rohstoff. Der Mittelwert lag bei 40 €/t CO_2-Äq. (KTBL, 2010).

Schmidt et al. (2009, 2010, 2011) analysierten mit einem räumlich expliziten Energiesystemmodell die Systemkosten sowie die Menge an CO_2-Emissionen und fossilen Energieträgern, die eingespart werden können, und wenden dieses Modell für unterschiedliche Fragestellungen an. Mit einer Potenzialanalyse für Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) wurde gezeigt, dass zwar beträchtliche Potenziale für biomassebetriebene KWK vorhanden sind, dass aber die Abwärmenutzung der Kraftwerke sehr stark von der räumlichen Verteilung der Wärmenachfrage beschränkt wird (Schmidt et al., 2009). Bei Holzpreisen, die nicht stark vom historisch beobachtetem Niveau abweichen, sind KWK-Anlagen mit neuester Technologie (Gasifizierung) bei voller Nutzung der Abwärme in der Lage, rund 2 TWh/Jahr Strom zu am Markt kompetitiven Preisen zu produzieren (Schmidt et al., 2009). Bei einer deutlichen Ausweitung der Produktion nimmt durch den dadurch induzierten Preisanstieg auf Rohstoffseite die Wettbewerbsfähigkeit allerdings deutlich ab (Schmidt et al., 2011). Ein Vergleich der Wettbewerbsfähigkeit von neuen Technologien weist darauf hin, dass sich CO_2-Emissionen mit Hilfe von Strom- und Wärmeproduktion wesentlich effizienter reduzieren lassen als durch Biotreibstoffe der ersten und zweiten Generation und vor allem der Einsatz von Carbon Capture and Storage in Verbindung mit Bioenergie ein Potenzial für signifikante Emissionseinsparungen aufweist (Schmidt et al., 2010). Die kosteneffektivere Reduktion von CO_2-Emissionen im Wärme- und Stromsektor im Vergleich zur Treibstoffproduktion wird auch in einer Studie von Kalt et al. (2010b) für Österreich bestätigt. Diese Ergebnisse entsprechen jenen anderer Studien, die nicht für Österreich durchgeführt wurden (WBGU, 2009; Wetterlund, 2010).

Die Ergebnisse einer Kosteneffektivitätsanalyse von verschiedenen Bioenergie-Politikinstrumenten belegen, dass Beimischungsverpflichtungen für Biotreibstoffe ein ineffektives Politikinstrument darstellen, während Steuern auf fossile CO_2-Emissionen das kosteneffektivste Politikinstrument zur Emissionsreduktion wären (Schmidt et al., 2011). Diese Studie, die auch Biomassepotenziale in Forst- und Landwirtschaft berücksichtigt, zeigt, dass Holz aus Kurzumtriebsplantagen für die Bioenergieproduktion der rentabelste Rohstoff aus landwirtschaftlicher Produktion ist und bei weitem die größten Einsparungen von CO_2-Emissionen ermöglichen würde.

Die Studie untersucht allerdings keine integrierten Ansätze bioenergetischer Produktion, wie sie in Abschnitt 2.2.1 beschrieben werden. Insgesamt können bei einem CO_2-Preis von 75 €/t CO_2 mit zusätzlicher heimischer Biomasse aus Land- und Forstwirtschaft zusätzlich 7,5 Mt/Jahr CO_2 eingespart werden. Bei Verwendung von Carbon Capture and Storage könnte diese Menge mehr als verdoppelt werden, wobei die Einführung von Carbon Capture and Storage in Österreich als äußerst unwahrscheinlich einzuschätzen ist. Die Auswirkungen auf die landwirtschaftliche Landnutzung und die Intensität der Bewirtschaftung des Forsts sind erheblich. Die Studie berücksichtigt allerdings keine indirekten, systemischen Effekte der Ausweitung der Bioenergieproduktion auf Forst- und Landwirtschaft (vgl. Abschnitte 2.8.2). Die Emissionseinsparungen sind daher als Werte bei angenommener kohlenstoffneutraler Bereitstellung der Biomasse anzusehen – bei einer Gesamtbetrachtung können die Einsparungen deutlich geringer ausfallen.

2.6.2 Kosten und Nutzen von Klimaanpassungsmaßnahmen

Eine erste Pilotstudie zu den Kosten des Klimawandels ohne geplante Anpassungsmaßnahmen wurde Anfang 2013 gestartet („The Costs of Inaction – COIN", Leitung: Wegener Center Graz). In diesem Bereich sind derzeit kaum Datengrundlagen vorhanden. Weitere Anhaltspunkte liefern Ergebnisse des Projektes ADAPT.AT, in dem autonome und geplante Anpassungen bis 2040 modelliert wurden. Diese zeigen für Österreich insgesamt eine Zunahme der Produktivität in den meisten Klimasimulationen, die durch Anpassungsmaßnahmen noch weiter gesteigert werden kann. Auf regionaler Ebene ergeben sich jedoch deutliche Unterschiede mit Profiteuren und Verlierern durch den Klimawandel. Modellierte Anpassungsmaßnahmen beinhalten Veränderungen der Kulturen, Bewirtschaftungsintensitäten, Bodenbearbeitungsverfahren, Tierbestände und Bewässerungsflächen (Schönhart et al., submitted).

Analysen über eine optimale Fruchtfolgegestaltung bzw. Landnutzung im Marchfeld erlauben es, die ökonomische Effizienz von Bewässerung im Marchfeld unter künftigen Klima- und sozioökonomischen Szenarien grob abzuschätzen (Heumesser et al., 2012; Strauß et al., 2010, 2011). Da in Zukunft im Marchfeld ein höherer Bewässerungsbedarf zu erwarten ist (Eitzinger et al., 2010; Thaler et al., 2012), nimmt aus ökonomischer Sicht die Bedeutung von Bewässerung und deren Effizienz zu. Allerdings wird nicht damit gerechnet, dass bis 2040 Tröpfchenbewässerungsanlagen bei Dauerkulturen rentabel eingesetzt werden können, wobei die Wirtschaftlichkeit von Tröpfchenbewässerung in erster Linie von der Höhe eines eventuellen Wasserpreises, den Mechanisierungskosten sowie den Nutzen der Bewässerung abhängt. Anreize für eine effizientere Wassernutzung werden allerdings zunehmen. Derzeit werden die im Marchfeld vorhandenen Beregnungssysteme ineffizient eingesetzt; das Einsparungspotenzial bei der benötigten Wassermenge wird auf bis zu 30 % geschätzt (Eitzinger et al., 2009a).

2.7 THG-Reduktion durch nachhaltigeren Konsum im Bereich Lebensmittel und Ernährung
2.7 GHG reduction through sustainable food consumption

Während Umweltbelastungen meist zu einem erheblichen Teil bei der Produktion entstehen, wird der Konsum vielfach als eigentliche Antriebskraft der Produktion angesehen (UNEP, 2010). Entsprechend dieser Sichtweise werden z. B. THG-Emissionen in der Vorleistungskette mit Hilfe verschiedener Methoden, wie etwa der Lebenszyklusanalyse (LCA für „Life Cycle Assessment") oder der Input-Output-Analyse, den konsumierten Gütern zugerechnet. Mit solchen Methoden können Veränderungen in den THG-Emissionen, die durch Änderungen im Lebensstil und damit in den Konsummustern entstehen, abgeschätzt werden.

2.7.1 Potenziale zur THG-Reduktion durch Änderungen in der Ernährung

Nach einer Studie über die Umweltfolgen des Konsums in den EU-25-Ländern gehen knapp 30 % der durch Konsum verursachten THG-Emissionen auf Lebensmittel zurück (Tukker et al., 2006). Auf den Konsum von Fleisch- und Milchprodukten entfallen in der EU-27 14 % der gesamten THG-Emissionen. Auf Fleisch- und Milchprodukte entfällt in der EU-27 etwa ein Viertel eines von der EEA erarbeiteten Summenindikators für negative Umweltfolgen (EEA, 2012).

In Österreich dürften die THG-Emissionen durch den Lebensmittelkonsum in einer ähnlichen Größenordnung liegen wie in Deutschland (Abbildung 2.10). In Deutschland entfällt etwa die Hälfte der durch die Ernährung verursachten THG-Emissionen auf die landwirtschaftliche Produktion, wobei etwa 47 % auf die Emissionen der Tierproduktion und ungefähr 9 % auf die Pflanzenproduktion zurückgehen. Die verbleibenden 44 % der THG-Emissionen für Ernährung teilen sich auf Verarbeitung, Handel und Verbraucheraktivitäten (wie z. B. Kühlung, etc.) auf.

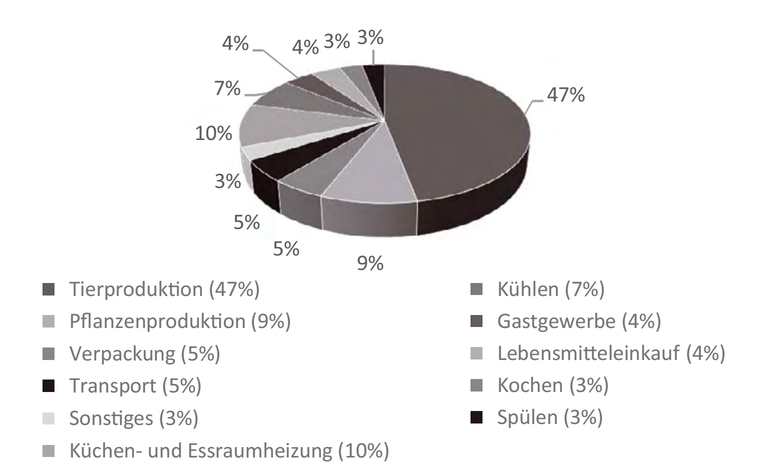


Abbildung 2.10 Anteil (%) der emittierten CO_2-Äquivalente pro Jahr innerhalb von Landwirtschaft und Ernährung. Quelle: Enquête-Kommission, 1994; Koerber und Kretschmer (2000, S. 40)

Figure 2.10 Share (%) of emitted greenhouse gases (CO_2 equivalents per year) in the agriculture and food sector. Source: Enquete-Kommission, 1994, Koerber and Kretschmer (2000, p. 40)

In Österreich beträgt der durchschnittliche Fleischverbrauch pro Kopf etwa 100 kg/Jahr (inkl. Knochen, Sehnen und weiteren nicht verzehrten Geweben), was deutlich über dem Niveau der Industrieländer mit ca. 79,2 kg/Kopf im Jahr 2010 liegt (FAO, 2012). Dabei entfallen 56,8 kg/Kopf/Jahr auf Schweinefleisch, 18,3 kg/Kopf/Jahr auf Rind- und Kalbfleisch, 20,1 kg/Kopf/Jahr auf Geflügel und der Rest auf andere Fleischsorten (Statistik Austria, 2014). In Österreich werden in einem Jahr über 70 Mio. Hühner, 5,6 Mio. Schweine, 620 000 Rinder und 290 000 Schafe geschlachtet (Statistik Austria, 2010). Der direkte Verzehr (ohne Knochen, Sehnen und weiteren nicht verzehrten Geweben) liegt bei ca. 66 kg/Kopf/Jahr (AMA, 2013).

In einer Analyse von De Vries und De Boer (2010) wurden 16 LCA-Studien miteinander verglichen, um die THG-Emissionen verschiedener tierischer Produkte abzuschätzen. Demnach betragen die Emissionen bei der Produktion pro kg Fleisch bei Rindfleisch 14–32 kg CO_2-Äq., bei Schweinefleisch 3,9–10,0 kg CO_2-Äq. und bei Geflügel 3,7–6,9 kg CO_2-Äq., was um ein Vielfaches höher liegt als bei pflanzlichen Produkten. Die THG-Emissionen pro kg Milch betrugen 0,84–1,3 kg CO_2-Äq. und die von Eiern 3,9–4,9 kg CO_2-Äq., beides deutlich unter den Werten von Fleisch, was zum Teil auch am relativ hohen Wassergehalt liegen dürfte. Die Resultate von De Vries und De Boer (2010) liegen weitgehend im Rahmen der Werte, die in anderen internationalen Studien angegeben wurden (Tabelle 2.5).

Tierische Produkte weisen demnach im Durchschnitt um den Faktor 10–20 höhere THG-Emissionen pro Nahrungskalorie auf als pflanzliche Produkte (Fritsche und Ebele, 2007; Hörtenhuber et al., 2010, 2011; Lindenthal et al., 2010; Schlatzer, 2011; Wiegmann et al., 2005). In absoluten Zahlen verursachen Milchprodukte hingegen in Deutschland auf Grund der großen Verzehrsmenge den größten Anteil an den ernährungsbedingten THG-Emissionen; sie liegen noch vor Fleisch (Fritsche und Eberle, 2007; Wiegmann et al., 2005).

In Europa sind Tierhaltungssysteme und -strukturen auch innerhalb der einzelnen Fleischkategorien (Schwein, Huhn, Rind, etc.) sehr heterogen organisiert, was am Beispiel der Rinderhaltung ersichtlich wird. So waren etwa bei Rindfleisch die THG-Emissionen in Österreich mit 14,2 kg CO_2-Äq./kg europaweit am niedrigsten (JRC, 2010). Dabei werden in Österreich hohe CH_4-Emissionen in der Rinderhaltung durch niedrigere Emissionen aus Veränderungen in der Landnutzung und Landbedeckung kompensiert, was aus dem hohen Selbstversorgungsgrad bei Futtermitteln in der Weidehaltung resultiert, der sich unter anderem durch den hohen Anteil von Gras bei der Fütterung ergibt. Gleichzeitig importiert Österreich pro Jahr rund 550 000 t Sojaschrot (mit einem Anteil von 90 % GMO[12]-Soja) für die Verwendung als Eiweiß-Futtermittel. Davon stammen zwei Drittel aus Brasilien und Argentinien und ein Drittel aus den USA (AGES, 2012). Der Großteil des Soja geht in die Futtermittelproduktion; global sind es 90 % (Steinfeld et al., 2006). Die rapide Expansion der Sojaproduktion in Brasilien wird in einer Reihe von Studien mit der global wachsenden Fleischproduktion in Verbindung gebracht (McAlpine et al., 2009; Soares-Filho et al., 2006).

Ein Wechsel von einer Mischkost auf eine ovo-lacto-vegetarische Ernährung kann die THG-Emissionen in der Vorleistungskette um etwa 30–50 % vermindern (Hoffmann, 2002; Taylor, 2000). Modellberechnungen zeigen, dass ein Umstieg auf vegane Ernährung zu noch größeren THG-Einsparungen führt (Baroni et al., 2006; Eshel und Martin, 2006).

Im Zuge der österreichischen Studie „GERN – Gesunde Ernährung und Nachhaltigkeit“ wurden die Auswirkungen einer Umstellung des österreichischen Ernährungsverhaltens auf

[12] Genetic Modified Organisms

Tabelle 2.5 THG-Emissionen unterschiedlicher Lebensmittel je kg Produkt und je Nährwert der Produkte (De Vries und De Boer, 2010; Hörtenhuber et al., 2011; Lindenthal et al., 2010; Schlatzer, 2011; Weidema et al., 2008). Nährwerte wurden gemäß FAO (2003) errechnet

Table 2.5 GHG emissions of different food items per kg of product and per food calorie (De Vries and De Boer, 2010; Hörtenhuber et al. 2010, 2011; Lindenthal et al., 2010; Schlatzer, 2011; Weidema et al., 2008). Calorific values were calculated using data from FAO (2003)

	kg CO_2-eq. / kg Lebensmittel	kg CO_2-eq. / 1 000 kcal Lebensmittel
Tierische Produkte		
Rindfleisch	13–30	8,84–20,40
Käse	9–13	3,00–4,34
Schweinefleisch	5–10	2,43–4,85
Hühnerfleisch	4–7	2,98–5,22
Eier	5–7	3,58–5,01
Fisch	2–4	1,67–3,33
Milch	1–1,5	1,74–2,60
Pflanzliche Produkte		
Tofu	1,1	1,83
Teigwaren	0,9	0,25
Brot	0,55–0,8	0,23–0,33
Obst	0,5	1,00
Weizen	0,35–0,5	0,10–0,14
Kartoffeln	0,1–0,2	0,15–0,31
Gemüse	0,1–0,2	0,50–1,00

eine ausgewogene Ernährung gemäß der Richtlinien der DGE (Deutsche Gesellschaft für Ernährung) untersucht. Durch eine Halbierung des Fleischkonsums kann demnach der Ausstoß an klimarelevanten Treibhausgasen von 890 auf 580 kg / Person / Jahr CO_2-Äq. gesenkt werden. Neben dem geringeren Energie- und Düngerverbrauch, der aus der Umstellung resultieren würde, könnte auch der Flächenbedarf von 3 600 auf 2 600 m^2 / Person reduziert werden. Laut Zessner et al. (2011) könnte sich Österreich unter diesen Bedingungen nicht nur ohne Futtermittelimporte selbst versorgen, sondern es würden sogar landwirtschaftlich genutzte Flächen frei werden. Der Verzicht auf den Konsum tierischer Produkte muss jedenfalls aus einer internationalen Perspektive betrachtet werden. Aufgrund von Leakage-Effekten kann regionalen Alleingängen, z. B. mittels Steuern, über internationale Marktverflechtungen entgegen gewirkt werden. Cordts et al. (2013) versuchen das mit einem partiellen Gleichgewichtsmodell zu analysieren.

Der Effekt einer Umstellung auf vegetarische Ernährung kann helfen, einem durch Umstellung auf Bioprodukte eventuell steigenden Landbedarf entgegenzuwirken. Durch kombinierten Umstieg auf vegetarische und biologische Ernährung lässt sich die persönliche Treibhausgasbilanz der Ernährung um bis zu 66 % senken (Hoffmann, 2002). Biologische Landwirtschaft weist in der Regel pro Hektar sowie in der Prozesskette eine bessere Treibhausgasbilanz auf als konventionelle Landwirtschaft (Hörtenhuber et al., 2010, 2011; Hülsbergen, 2011, Lindenthal et al., 2010). Biologisch bewirtschaftete Flächen weisen im Vergleich zu konventionell bearbeiteten Flächen in der Regel eine deutlich bessere Humusbilanz und eine höhere Biodiversität auf und führen zu geringeren Schadstoffeinträgen in die Umwelt (Lindenthal et al., 2010; Hörtenhuber et al., 2010). Allerdings ist zu berücksichtigen, dass der biologische Anbau von Lebensmitteln einen geringeren Ertrag pro Hektar und Jahr aufweist. Folglich ist eine deutlich größere Fläche als im konventionellen Anbau erforderlich, um die gleiche Menge an Getreide (oder anderen Produkten) zu produzieren. Nimmt man an, dass aufgrund der im Biolandbau geringeren Erträge pro Hektar bisherige Grünlandflächen in Acker umgewandelt werden müssten, um die Versorgung zu sichern, so schneidet der Biolandbau im Vergleich zum konventionellen Landbau in Bezug auf die THG-Bilanz möglicherweise schlechter ab. Berechnungen mit einem globalen Biomassebilanzmodell zeigen, dass bei einer Weltbevölkerung von neun Milliarden Menschen im Jahr 2050 ein Umstieg auf biologische Landwirtschaft ohne großflächige Entwaldung nur bei einem geringen Anteil tierischer Produkte an der Ernährung möglich wäre (Erb et al., 2012a, b; Haberl et al., 2010, 2011).

2.7.2 THG-Reduktion durch Vermeidung von Lebensmittelabfällen

Die FAO (2011) schätzt, dass global etwa ein Drittel der produzierten Lebensmittel entlang der Produktkette verloren gehen bzw. entsorgt werden, was einer Menge von 1,3 Mrd. t/Jahr entspricht. In der Europäischen Union landen insgesamt 89 Mio. t/Jahr Lebensmittel im Abfall; in Österreich sind es 1,9 Mio. t/Jahr (EC, 2009). Entlang der Produktionskette der in Europa weggeworfenen Lebensmittel entstehen nach Schätzungen dieser Studie im Durchschnitt Emissionen von zumindest 1,9 t CO_2-Äq. pro Tonne Lebensmittelabfall. Auf europäischer Ebene ergibt sich eine Gesamtmenge von 170 Mio. t/Jahr CO_2-Äq.. Dies entspricht 3 % der gesamten jährlichen THG-Emissionen der EU-27 bzw. den gesamten Emissionen der Niederlande. Mit 42 respektive 39 % geht der Hauptteil aller jährlichen THG-Emissionen durch Lebensmittelabfälle auf Privathaushalte und den Produktionssektor zurück, der Rest verteilt sich mit 14 respektive 5 % auf Gastronomie und Einzelhandel (EC, 2009). Die FAO (2011) schätzt den jährlichen Verlust an Nahrungsmitteln entlang der Produktionskette auf 280 bis 300 kg/Person. Im Haushalt werden im europäischen Durchschnitt pro Person und Jahr 95 bis 115 kg Lebensmittel entsorgt (Kummu et al., 2012).

Parfitt et al. (2010) geben auf Basis verfügbarer Studien eine Übersicht über die Verluste zwischen Produktion und Konsum für verschiedene Weltregionen. Sie zeigen, dass in industriellen Ländern die Getreideverluste, die zwischen Ernte und Verarbeitung auftreten, eher vernachlässigbar sind. Deutlich höher sind die Verluste zwischen Ernte und Verkauf bei Obst und Gemüse. Nach WRAP (2009, 2010) fallen im Vereinigten Königreich jährlich 18,4 Mio. t Nahrungsmittelabfälle (inkl. Getränke) an. Ungefähr 65 % dieser Lebensmittelabfälle stammen aus den Haushalten, 27 % aus der Lebensmittelverarbeitung und 8 % aus Handel und Lebensmitteldistribution. Lebensmittelverluste in der landwirtschaftlichen Produktion wurden hierbei nicht berücksichtigt (WRAP, 2010). Pro Kopf fallen damit im Vereinigten Königreich jährlich 182 kg an Nahrungsmitteln und Getränken als Abfall an, wobei hier auch jene Fraktionen enthalten sind, die nicht oder nur schwer vermeidbar sind. Im Bereich der Haushalte liegt laut dieser Studie der vermeidbare Anteil bei 64 %, bezogen auf das Gesamtgewicht. Betrachtet man nur die Nahrungsmittelabfälle der privaten Haushalte (ohne Getränke), so liegen die vermeidbaren Lebensmittelabfälle bei 72 kg/Kopf/Jahr. Laut WRAP (2010) werden durch Lebensmittelabfälle im Vereinigten Königreich etwa 10 Mio t CO_2-Äq. innerhalb der Lebensmittelverarbeitung und 26 Mio. t CO_2-Äq. in den Haushalten verursacht. Für Nebenprodukte, wie etwa Futtermittel in der Viehproduktion, betragen die THG-Emissionen 3,7 Mio. t CO_2-Äq.

Daten über Nahrungsmittelabfälle in privaten Haushalten sind für einzelne österreichische Regionen bzw. Bundesländer verfügbar. Die insgesamt anfallenden Lebensmittelabfälle werden in allen Regionen mit 20,8–28,8 kg/Kopf/Jahr relativ ähnlich eingeschätzt. Auch die vermeidbaren Lebensmittelabfälle weichen mit 12,1–14,1 kg/Kopf/Jahr in den beiden Regionen, in denen dieser Anteil erhoben wurde, kaum voneinander ab. Auffällig ist dabei ein Gefälle zwischen Land und Stadt: pro Person fallen gemäß diesen Erhebungen in städtischen Gebieten um 59 % (für Oberösterreich) bis 231 % (für Salzburg) mehr Lebensmittelabfälle an als in den ländlichen Gebieten der jeweiligen Region (Lauk et al., 2012b).

Für Österreich insgesamt zeigen aktuelle Studien, dass pro Person und Jahr 12 kg an originalverpackten und unverpackten Lebensmitteln im Restmüll landen (Hauer und FH Analytik, 2010). Bei Berücksichtigung der in dieser Studie nicht erfassten Speisereste und Lebensmittelabfälle beläuft sich das Abfallvermeidungspotenzial auf 42 kg/Kopf/Jahr. Bezogen auf den Lebensmittelverbrauch bedeutet das, dass um 10 % mehr eingekauft als verbraucht wird. Nach einer für das deutsche Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz durchgeführten Studie werden in Deutschland 81,6 kg/Kopf/Jahr Lebensmittel weggeworfen, die vermeidbare Menge an Lebensmittelabfällen wurde auf 46,2–59,9 kg/Kopf/Jahr geschätzt (Kranert et al., 2012).

Diese Zahlen deuten darauf hin, dass die Frage der vermeidbaren Lebensmittelabfälle in Österreich trotz vermehrter Aufmerksamkeit noch zu wenig untersucht sein dürfte. Bezieht man die für Österreich erhobenen Daten für Lebensmittelabfälle im Haushalt auf die durchschnittliche Verzehrmengen in Österreich, die bei etwa 340 kg/Kopf/Jahr liegen, so würden die vermeidbaren Lebensmittelabfälle lediglich einen Anteil in der Größenordnung von 3–4 % an den insgesamt verzehrten Nahrungsmitteln einnehmen, was im Vergleich zu internationalen Studien unplausibel niedrig erscheint. Dies kann möglicherweise zum Teil durch den Umstand erklärt werden, dass diese Zahlen nicht die Lebensmittelabfälle der Gastronomie enthalten; weitere Studien erscheinen jedoch sinnvoll.

2.7.3 Außenhandel mit landwirtschaftlichen Produkten

Um die weltweiten ökologischen Auswirkungen der Produktion und des Konsums eines bestimmten Landes zu bewerten, ist es notwendig, den internationalen Handel und dessen

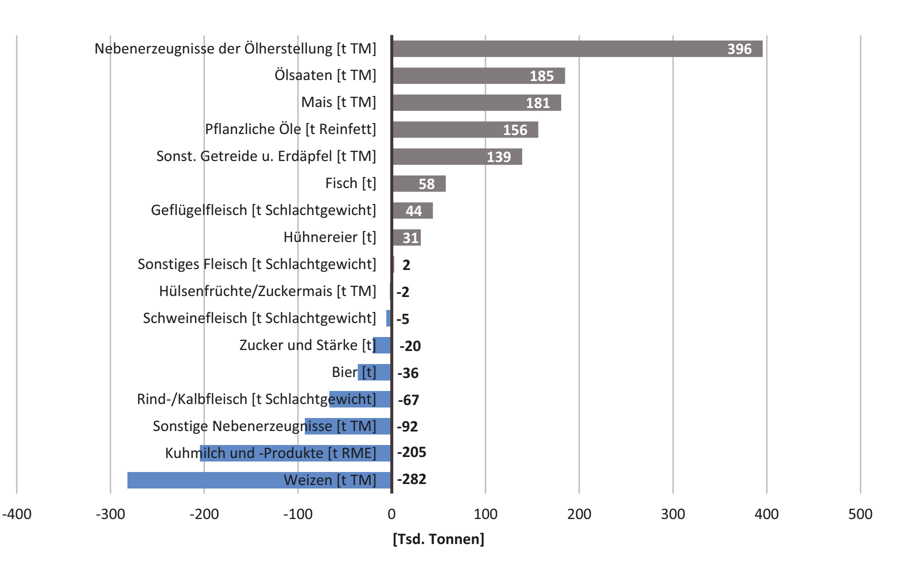


Abbildung 2.11 Jährliche Nettoimporte und -exporte Österreichs im Durchschnitt des Zeitraums 2003–2007 (BMLFUW, 2000–2012) in Tonnen [t], Tonnen Trockenmasse [t TM] bzw. Tonnen Roh-Material Äquivalent [t RME]. Ein positives Vorzeichen bedeutet einen Nettoimport, ein negatives Vorzeichen einen Nettoexport. Quelle: Lauk et al. (2012a)

Figure 2.11 Yearly net imports and exports of Austria, average of the years from 2003–2007 (BMLFUW, 2000–2012), in tons [t], tons dry matter [t DM], respectively tons of raw material equivalent [t RME]. A positive sign indicates net import, negative sign net export. Source: Lauk et al. (2012a)

„CO_2-Rucksack“ mit einzubeziehen. Nur so können mögliche Verlagerungen von Umweltbelastungen in Folge von veränderten globalen Produktions-, Handels- und Konsummustern erkannt und analysiert werden. Aktuelle Studien zeigen, dass durch den österreichischen Konsum im Bereich Ernährung weltweit deutlich mehr Emissionen verursacht als im Land selbst emittiert werden (sogenannte „graue“ THG-Emissionen, d.h. THG-Emissionen außerhalb Österreichs in der Vorleistungskette). Im Jahr 2005 überstieg die Zahl der durch Österreichs Nahrungsmittelkonsum verursachten Emissionen jene der Produktion um 58 % (Wiebe et al., 2012). Damit liegt Österreich im globalen Vergleich an der achten Stelle unter den CO_2-Netto-Importeuren.

Abbildung 2.11 zeigt die jährlichen Nettoimporte und -exporte Österreichs im Durchschnitt des Zeitraums 2003 bis 2007 für verschiedene Nahrungsmittelkategorien (BMLFUW, 2000–2012). Bei den „Nebenprodukten der Ölherstellung“ handelt es sich um den als Eiweißfuttermittel bedeutsamen Sojaextraktionsschrot. Die importierten Sojafuttermittel sind demnach in Fragen derzeitiger und zukünftiger Ernährungssicherheit von hoher Relevanz.

Abbildung 2.11 verdeutlicht, wie stark Österreich zur Deckung des durch die Ernährung verursachten Biomassebedarfs inzwischen auf eine Nutzung von Flächen außerhalb seiner Landesgrenzen angewiesen ist. Allerdings ist die Auslandsabhängigkeit verglichen mit dem inländischen Gesamtverbrauch und im Vergleich zu vielen anderen europäischen Ländern noch immer relativ niedrig und bezieht sich vor allem auf Ackerfläche (Haberl et al., 2012a). Dieser höhere Bedarf an Ackerland wird vor allem durch die Eiweißfuttermittel, die heute vor allem in Form von Sojaextraktionsschrot importiert werden, verursacht. Lauk et al. (2012b) weisen darauf hin, dass bei einer sich am Trend orientierenden Ernährungsentwicklung im Jahr 2050 320 000 t/Jahr mehr Ölfrüchte und 380 000 t/Jahr mehr Hülsenfrüchte (jeweils in Trockenmasse [TM]) inländisch produziert werden müssten.

2.8 Systemische Effekte, Risiken und Unsicherheiten bezogen auf Land- und Forstwirtschaft, Wasserwirtschaft und Ökosysteme

2.8 Systemic effects, risks and uncertainties related to agriculture, forestry, water management and ecosystems

2.8.1 Landnutzungstrends in Österreich

Betrachtet man die Entwicklung der Landnutzung über die letzten Jahre, so weist Österreich eine Nettozunahme der Waldfläche und der Flächenversiegelung durch Bebauung auf. Das Wachstum der Waldfläche ist laut österreichischer Waldinventur im Jahresschnitt leicht rückläufig: es betrug 5 100 ha in der Periode 2000/2002 und 4 300 ha in den Jahren 2007/2009. Die landwirtschaftlich genutzten Flächen nehmen derzeit um ca. 3 000 ha/Jahr ab. Die Siedlungsflächen wuchsen in den Jahren 2002 bis 2008 kontinuierlich. Der Zuwachs an Bauland- und Verkehrsflächen verminderte sich von rund 20 Hektar pro Tag in den 1990er Jahren auf zehn bis zwölf Hektar täglich in den letzten Jahren. Der große Anteil von Gebirgen

an Österreichs Landesfläche hat zur Folge, dass nur 37 % der Landesfläche für dauerhafte Besiedlung geeignet ist. Heute beträgt der Anteil der Siedlungsfläche am Dauersiedlungsraum österreichweit bereits 16 %, die Bau- und Verkehrsflächen nehmen alleine 13,5 % ein (Umweltbundesamt, 2008).

Nicht jede „Baufläche" ist auch versiegelt: Anders als bei Verkehrsflächen, ist nur etwa ein Drittel der österreichischen Baufläche tatsächlich versiegelt, der größere Rest entfällt auf unbefestigte und begrünte Nutzungen wie Hausgärten. Die Nachfrage nach Bauland ist das Resultat von veränderten Lebensstilen – dem Anstieg der Pkw-Verfügbarkeit, steigendem Wohlstand, Abnahme der Haushaltsgrößen und damit Zunahme von (oft motorisierten) Einzelhaushalten – und immer höheren Wohnansprüchen (größere Wohnungen, Gärten, etc.). Durch Bebauung gehen dauerhaft biologisch produktive Flächen für Zwecke der Land- und Forstwirtschaft und als Lebensraum für wild lebende Tiere und Pflanzen verloren. Gleichzeitig nimmt die Waldfläche vor allem auf Kosten der landwirtschaftlich genutzten Fläche zu (vgl. Abschnitt 2.3.1). Die ursprüngliche Bodenfruchtbarkeit ist bei Rückbauten in der Regel kaum wieder herstellbar (Tötzer et al., 2009).

Nach Erb (2004) und Gingrich et al. (2007) würde der Kohlenstoffbestand (also die gesamte in Vegetation und Böden gespeicherte Kohlenstoffmenge) auf dem österreichischen Territorium in einem hypothetischen Fall ohne jegliche menschliche Landnutzung etwa zwei Milliarden Tonnen (2 Gt C) betragen, während er heute bei etwa 1,25 Gt Kohlenstoff liegt, wovon ein großer Teil auf den Wald (ober- und unterirdisch) entfällt, der Rest überwiegend auf den Bodenkohlenstoff von Ackerflächen, Grünland und anderen Ökosystemen (z. B. alpine Vegetation). Der heutige Kohlenstoffvorrat in Böden und Vegetation ist bedeutend (ca. 20 %) größer als jener im Jahr 1830 (rund 1,04 Gt C). Der Zuwachs geht zu einem großen Teil auf die Zunahme von Waldfläche (siehe oben) und Bestockung des Waldes zurück (Erb et al., 2008; Gingrich et al., 2007), wenngleich diese Tendenz in der letzten Inventurperiode der Österreichischen Waldinventur geringer als früher war. Diese Entwicklungen tragen mittelfristig zu einer erhöhten Kohlenstoffspeicherung in neu zugewachsener Bestandsbiomasse bei; langfristig wirken sie tendenziell in Richtung Erhöhung des Bodenkohlenstoffgehalts, wobei dieser Effekt durch den Einfluss des Klimawandels konterkariert werden könnte (vgl. Abschnitt 2.3.1).

In sämtlichen Landnutzungskategorien, sei es landwirtschaftlich oder forstwirtschaftlich genutztes Land, könnte der voranschreitende Klimawandel das Kohlenstoffspeicherpotenzial stark beeinflussen (vgl. Band 2, Kapitel 5). Es gibt Hinweise darauf, dass höhere Temperaturen und geänderte Niederschlagsmuster zu einem Rückgang der Bodenkohlenstoffvorräte führen könnten (Smith, 2005; Soussana et al., 2009). Für Acker- und Grünlandböden in Europa wird für das 21. Jahrhundert jedoch vor allem eine starke Beeinflussung der Entwicklung durch die Art der landwirtschaftlichen Nutzung konstatiert (Smith, 2005; Bondeau et al., 2007). In den letzten Jahrzehnten hat die terrestrische Vegetation erhebliche Mengen vom Menschen freigesetzten Kohlenstoffs gebunden. Somit haben bisher die wachstumsfördernden Effekte überwogen. In der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts könnte sich dieser Effekte allerdings ins Gegenteil verkehren und Vegetation und Böden zu einer CO_2-Quelle werden (Le Quere et al., 2009).

Veränderungen im Kohlenstoffhaushalt der Ökosysteme in Österreich resultieren bisher vor allem aus dem Wechselspiel zwischen Intensivierung der Landwirtschaft und Aufforstung bzw. Verwaldung. Erklärtes Ziel von Naturschutzmaßnahmen in Österreich ist es jedenfalls, die Freisetzung von Treibhausgasen aus Ökosystemen zu reduzieren oder die Kohlenstoffspeicherung von Ökosystemen erhöhen (Grünig und Steiner, 2010). In diesem Bereich kann es Synergien zwischen forstwirtschaftlichen Interessen, Kohlenstoffaufbau und Naturschutzzielen geben (vgl. Abschnitt 2.5.2). Viele dieser Maßnahmen sind ökonomisch vergleichsweise günstig und gehen mit hohem Wirkpotenzial einher. Da intakte Feuchtgebiete große Mengen an Kohlenstoff speichern, können Maßnahmen wie Wiedervernässung von entwässerten Feuchtgebieten einen Beitrag zur THG-Reduktion leisten und gleichzeitig der Erreichung von Naturschutzzielen dienen. Derartige Maßnahmen sind zudem relativ kostengünstig (vgl. Abschnitt 2.6.2). Allerdings kann es dabei zu einem Rückgang der Produktivität von landwirtschaftlich genutzten Flächen (bis hin zu deren Aufgabe) kommen – derartige Maßnahmen werden wohl nur bei entsprechenden Fördermaßnahmen gesetzt werden.

Von intakten Ökosystemen, welche der Naturschutz zu fördern versucht, werden zahlreiche Ökosystemleistungen erbracht, die für die Gesellschaft unerlässlich sind, für die jedoch kein Markt vorhanden ist. Sie werden daher kostenlos konsumiert. Durch den Klimawandel werden wichtige Ökosystemdienstleistungen gefährdet, was massive Auswirkungen auf die Gesellschaft hat, die sowohl auf die Ressourcenbereitstellung als auch die Abbaukapazitäten der Ökosysteme für Emissionen und Abfälle angewiesen ist. Um diese Ökosystemdienstleistungen zu sichern, können Anreize gesetzt werden, welche gesellschaftlich wichtige Ökosystemdienstleistungen fördern und ihre Zerstörung vermeiden. Einen Zugang einer verbesserten Umsetzung der Abgeltung von Ökosystemdienstleistungen stellt das Agrarfördersystem dar, welches sowohl Produktionsweisen als auch Schutzmaßnahmen durch öko-

nomische Abgeltungen reguliert (z. B. das ÖPUL Programm) (MOBI-e, 2006; Rüdisser et al., 2011). Förderungen dieser Art erfolgen in einem komplexen Geflecht von EU-Regelungen und nationalen Umsetzungsmaßnahmen. Oftmals sind die institutionellen Rahmenbedingungen dieses ökonomischen Anreizsystems nicht ausschließlich dem Ziel des Schutzes der Ökosystemleistungen bzw. dem Vermeiden von THG-Emissionen dienlich.

Maßnahmen in der Wasserwirtschaft, die längerfristig zur THG-Reduktion betragen, sind Landnutzungsänderungen im Einzugsgebiet (z. B. Aufforstung), welche den Oberflächenabfluss verringern oder Sedimente zurückhalten. Die Erhöhung der Biomasse im Boden verbessert nicht nur die Infiltrationseigenschaften und die Speicherkapazität des Bodens, sondern dient auch als Kohlenstoffsenke. Hingegen führen wasserwirtschaftliche Maßnahmen in einem engeren Sinn kaum zu Änderungen der THG-Emissionen des Wasserwirtschaftssektors selbst. Vielmehr können bauliche Maßnahmen zur Errichtung von Flussbauwerken kurzfristig den Energieeinsatz und damit die THG-Emissionen sogar erhöhen. Allfällige Einsparungen an THG erfolgen im Energiesektor durch Ersatz von Fossilenergie. Synergien in der Siedlungswasserwirtschaft erfolgen primär über Kostenreduktion für Energieeinsatz bzw. funktionelle Zusammenhänge / Optimierungen wie beispielsweise die Verminderung von Schäden durch extreme Niederwässer oder die Verringerung von Kosten für Hochwasserschutzbauten (vgl. Abschnitte 2.4.1 und 2.4.2).

Ausmaß und räumliche Muster der Landnutzung und damit die Entwicklung der Kulturlandschaften hängen eng mit der Energiestrategie zusammen, besonders im Fall der Bioenergie (Coelho et al., 2012). Es besteht somit ein enger Zusammenhang von Energiepolitik und Landnutzungspolitik (Haberl et al., 2003).

2.8.2 THG-Emissionen von Bioenergieproduktion und -nutzung

Der Einsatz fossiler Energieträger sowie Bodenbearbeitung und Düngung tragen zu THG-Emissionen in die Atmosphäre bei; dies gilt auch bei der agrarischen oder forstlichen Produktion von Biomasse für die Energiegewinnung. Andererseits kann Landnutzung durch Kohlenstoffsequestrierung und Produktion erneuerbarer Energie, wie etwa Bioenergie, zur THG-Reduktion beitragen (Smith et al., 2013).

Die Frage der Treibhausgasbilanz von Bioenergie im Vergleich zu fossilen Energieträgern wird kontrovers diskutiert. Dies betrifft sowohl die Emissionen in der Produktionskette, etwa Lachgas (N_2O), Methan (CH_4) aus der Bodenbearbeitung

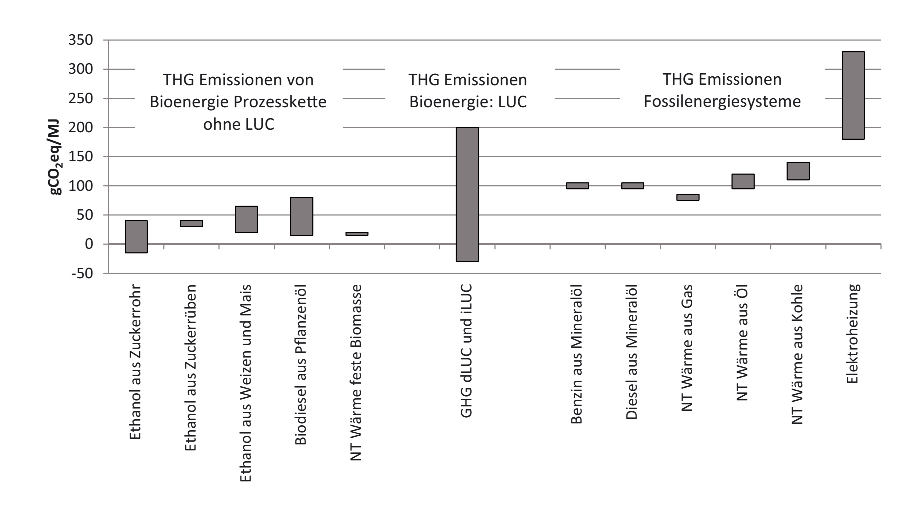


Abbildung 2.12 Emissionen von verschiedenen Energiesystemen pro Einheit genutzter Energie. Links: Bioenergie ohne Landnutzungseffekte (LUC), Mitte: Bandbreite der THG-Emissionen durch Landnutzungseffekte (direkt und indirekt), Rechts: Fossilenergiesysteme (Datenquellen: Chum et al., 2011; Haberl, 2013; Plevin et al., 2010; Searchinger, 2010; UNEP, 2009). NT … Niedertemperatur. Wie die Grafik zeigt, liegen die THG-Emissionen von Bioenergie in der Prozesskette in der Regel deutlich unter jenen der Fossilenergiesysteme. Die THG-Emissionen durch Landnutzungswandel (LUC) weisen eine große Bandbreite von Negativ (THG-Sequestrierung) bis zu Positiv (THG-Ausstoß in die Atmosphäre) auf und entscheiden somit darüber, ob durch einen Ersatz von Fossilenergie durch Bioenergie netto THG-Emissionen eingespart werden oder nicht

Figure 2.12 Emissions per unit energy of different energy systems. Left: bioenergy without land-use change (LUC) effects, middle: range of GHG emissions resulting from direct and indirect land-use change effects (LUC = iLUC and dLUC), right: fossil energy systems. Data sources: Chum et al., 2011, Haberl 2013, Plevin et al., 2010, Searchinger, 2010, UNEP, 2009. NT … low temperature. The figure shows that GHG emissions of bioenergy in the process chain are usually significantly below those of fossil energy systems. LUC-related GHG emissions may range from negative (GHG sequestration) to positive (GHG emissions to the atmosphere). LUC-related GHG emissions are hence decisive in answering the question whether a substition of bioenergy for fossil fuels saves GHG or not

oder Kohlenstoffdioxid (CO_2) aus dem Betriebsmitteleinsatz, die CO_2-Emissionen durch direkte und indirekte Veränderungen in der Landnutzung (Chum et al., 2011; Fargione et al., 2008; Haberl et al., 2012b; Searchinger et al., 2008, 2009; Searchinger, 2010; Sterner und Fritsche, 2011) sowie die Frage, welche fossilen Energieträger durch Bioenergie substituiert werden (Wetterlund et al., 2010; Schmidt et al., 2011).

Erhebliche Unsicherheiten bestehen insbesondere bezüglich der mit Landnutzungswandel verbundenen THG-Emissionen von Bioenergie (Abbildung 2.12). Diese können sowohl positiv oder negativ sein und entscheiden in vielen Fällen darüber, ob der Ersatz von Fossilenergie durch Bioenergie tatsächlich den erwünschten THG-Einspareffekt erzielt. Die Größe der mit Landnutzungswandel verbundenen THG-Emissionen hängt vor allem von zwei Faktoren ab: (1) der Nutzungsgeschichte des zum Bioenergieanbau verwendeten Landes und den Charakteristika der verwendeten Bioenergiepflanzen und (2) den systemischen Effekten, wie etwa der Verdrängung des Anbaus von Futter- und Lebensmitteln („indirect land use change", iLUC; siehe Chum et al., 2011; Searchinger et al., 2008, 2009; Searchinger, 2010).

Die erheblichen Daten- und Modellunsicherheiten, die mit einer Abschätzung von iLUC verbunden sind (Finkbeiner, 2013), rechtfertigen es nicht, systemische Effekte, die mit einem Ausbau der Bioenergie im großen Maßstab verbunden sind, zu ignorieren (Chum et al., 2011). Damit würde lediglich implizit angenommen, dass die mit iLUC verbundenen Emissionen Null seien, was in der Regel nicht korrekt ist (Haberl 2013; Plevin et al., 2010). Hinweise darauf, dass ein starker Ausbau der landwirtschaftlichen Bioenergieproduktion in Österreich zu Verdrängungseffekten und wahrscheinlich auch zu iLUC-Effekten führen würde, liefern Szenarioberechnungen von Kalt et al. (2010a, b), nach denen im Jahr 2030 bis zur Hälfte der gegenwärtigen österreichischen Ackerfläche für Bioenergie verwendet werden. Wenn der Ausbau der Bioenergie zur THG-Reduktion beitragen soll, ist es daher nötig, mit iLUC verbundene Emissionen in den offiziellen Berechnungsschemata zu berücksichtigen (Haberl et al., 2012; Searchinger, 2010). Die systemischen Effekte sind entscheidend dafür, welchen Beitrag Bioenergie zur THG-Reduktion leisten kann (Haberl, 2013).

Empirische Analysen (York, 2012) deuten zudem darauf hin, dass eine Ausweitung der Bereitstellung erneuerbarer Energie nicht automatisch zu einer Verringerung von Fossilenergie im gleichen Ausmaß führt. Die Annahme, dass eine zusätzlich erzeugte Einheit erneuerbare Energie tatsächlich zu einer Einsparung einer Einheit Fossilenergie führt, kann daher nicht ohne Weiteres vorausgesetzt werden; eine korrekte Abschätzung der THG-Reduktionseffekte von Bioenergie ist daher nur möglich, wenn die Substitutionseffekte verifiziert werden.

Umstritten ist nicht nur, inwiefern biogene Energieträger einen Beitrag zum Klimaschutz leisten können, sondern auch, ob und wie sie zu Nutzungskonflikten zwischen der Nahrungsproduktion und der Energieproduktion führen und somit die Nahrungsmittelversorgung gefährden. Ein Übergang von Fossilenergie zu biomassebasierter Energie hat vielfältige Auswirkungen auf die Kulturlandschaften. Die Potenziale zum Ausbau der Bioenergieproduktion hängen stark von den Veränderungen in der Landwirtschaft und in der Nachfrage nach landwirtschaftlichen Produkten, insbesondere der Ernährung, ab (Haberl et al., 2003).

Die Verwendung von Biomasse in verschiedenen Bereichen des Energieeinsatzes – Wärme, Strom oder Treibstoffe – führt zu unterschiedlichen Emissionseinsparungen, weil sich die substituierten fossilen Energieträger und deren Konversionseffizienzen unterscheiden. Wird ein bestimmter Sektor spezifisch gefördert, hat dies auch Auswirkungen auf den Einsatz der Biomasse in anderen Sektoren: durch die erhöhte Nachfrage nach Biomasse in einem Sektor steigen die Biomassepreise insgesamt und die Kompetitivität der Nutzung von Biomasse zur Produktion anderer Formen von Endenergie sinkt. So kann die Förderung der Stromproduktion aus Biomasse durch Einspeisetarife die Biomassepreise erhöhen und so die Kompetitivität im Wärmesektor senken, wo traditionell die meiste Biomasse mit dem höchsten Potenzial zur Senkung der CO_2-Emissionen eingesetzt wird. Ähnliches gilt für Beimischungsverpflichtungen für Biotreibstoffe (Kalt et al., 2010b; Wetterlund et al., 2010; Schmidt et al., 2011).

Die Nutzung biogener Energieträger ist nicht nur in der Landwirtschaft ein wichtiges Thema, sondern ist auch für die Forstwirtschaft relevant. Die energetische Verwendung forstlicher Biomasse leistet auf Grund systemischer Effekte nicht immer einen Beitrag zur THG-Reduktion (Abschnitt 2.3.3). Die besten Resultate im Hinblick auf die THG-Bilanz brachten Strategien zur integrierten Optimierung von Forstwirtschaft, inklusive Forstmanagement, Nutzung von Holz für langlebige Produkte, vor allem im Gebäudebereich, und Nutzung von Nebenprodukten, wie Schwachholz und Abfällen aus Produktion bzw. Produkten am Ende ihrer Lebenszeit für die energetischen Nutzung (Taverna et al., 2007). Eine kaskadische Nutzung von Biomasse (Haberl und Geissler, 2000; Haberl et al., 2003; Hasenauer, 2012) könnte auch im Bereich der Forstwirtschaft eine ökologisch effektivere Nutzungsstrategie darstellen als die einseitige Maximierung der Energieproduktion von Wäldern (vgl. Abschnitt 2.4.3).

Die Frage der optimalen Nutzung biogener Energieträger ist in jeder Region spezifisch zu beantworten. Bioenergie aus der Forst- wie auch der Landwirtschaft hat eine Reihe von regionalen sozioökonomischen Auswirkungen. Koland et al. (2010) analysierten das Potenzial energetischer Biomassenutzung unter künftigen Szenarien für die Region Süd-Oststeiermark. Sie zeigten, dass im Jahr 2030 der regionale Energiebedarf für Raumheizungen je nach Biomassepotenzial (gering, mittel, hoch) zu 21–23 % aus regionaler Biomasse gedeckt werden könnte (davon 10 % aus Forstwirtschaft und 13 % aus Landwirtschaft). Im Jahr 2050 wären es 27–33 % (davon 10 % aus Forstwirtschaft und 23 % aus Landwirtschaft). Biomasseproduktion aus Landwirtschaft hat das größere Zuwachspotenzial in dieser Region. Insgesamt ergeben sich in dieser Studie unter Berücksichtigung weiterer Faktoren positive Effekte nicht nur auf die regionale Treibhausgasreduktion, sondern auch auf regionale Beschäftigung und ökonomische Parameter. Eine zu starke Erhöhung der Versorgung aus regionaler Biomasse kann allerdings auch regional negative ökonomische Folgen nach sich ziehen: deutlich erhöhte Energiekosten für Haushalte, der Wegfall von öffentlichen Förderungen auf Grund von Intensivierungen in der Landwirtschaft und beim Einsatz von Kurzumtriebsplantagen mögliche negative Auswirkungen auf das Landschaftsbild (Schmidt et al., 2012).

Zusammenfassend ist festzustellen, dass es beim Ausbau der Biomasseproduktion zur Energiegewinnung eine Vielzahl an sozialen, ökonomischen und ökologischen Auswirkungen und Wechselwirkungen zu beachten gilt, etwa die Frage von Konkurrenzen um Fläche, Wasser oder andere Inputs, positive und negative soziale und ökonomische Auswirkungen, die Erhaltung von Bodenfruchtbarkeit, Biodiversität, Ökosystemen und die Vermeidung negativer Umweltfolgen (Chum et al., 2011; Coelho et al., 2012; Erb et al., 2012a, b; Haberl et al., 2011, 2013a). Systemische Effekte wie Landnutzungskonkurrenz sind dabei sowohl für die sozioökonomischen als auch für die ökologischen Auswirkungen sowie die THG-Emissionen wichtig (Haberl et al., 2013a; Smith et al., 2013). Nachhaltigkeitskriterien spielen in der Diskussion von Bioenergie eine zunehmend größere Rolle (Chum et al., 2011; Coelho et al., 2012; Haberl et al., 2010), können aber bei einseitiger Anwendung auf Biomasse für energetische Produktion die grundlegende Problematik nicht lösen (Frank et al., 2013).

2.9 Zusammenfassung von Handlungsoptionen
2.9 Summary of options

Land- und Forstwirtschaft, Wasserwirtschaft sowie Naturschutz können wichtige Beiträge zum Klimaschutz leisten. Gleichzeitig stehen sie vor der Herausforderung, sich an die Veränderungen im Klimasystem anzupassen, ohne ein exaktes Bild über die zu erwartenden Veränderungen zu verfügen. Zwischen THG-Minderung und Anpassung bestehen zahlreiche Wechselwirkungen (Synergien und Trade-offs), deren Verständnis und Berücksichtigung eine wichtige Voraussetzung dafür ist, erfolgreiche Strategien zum Umgang mit dem Klimawandel entwickeln und umsetzen zu können. Bei Planung und Umsetzung dieser Maßnahmen ist zu beachten, dass Ökosysteme eine ganze Reihe von unverzichtbaren Ökosystemleistungen liefern. Dies reicht von der Produktion von Rohstoffen für Ernährung, Fasern und Energie bis hin zu Regulierungs- und Schutzfunktionen, etwa dem Schutz vor Lawinen, Hochwasser oder Muren. Für erfolgreiche Strategien im Umgang mit dem Klimawandel ist es nötig, die gesamte Vielfalt dieser Funktionen mit zu bedenken, da die meisten möglichen Maßnahmen eine Vielzahl an Auswirkungen auf verschiedene andere Ökosystemleistungen haben können.

Eine Herausforderung aus Perspektive einer langfristig angelegten Klimaschutzpolitik mag darin bestehen, dass in den nächsten Jahren und Jahrzehnten in den gemäßigten Zonen infolge moderater Temperaturanstiege und ausreichender Niederschläge die Einbußen gering sein werden oder sogar Produktivitätszuwächse erwartet werden (Easterling et al., 2007). Dies verringert den Handlungsdruck in den Industriestaaten und kann darüber hinwegtäuschen, dass auch für Österreich in der zweiten Jahrhunderthälfte mit gravierenderen Änderungen des Klimas gerechnet werden muss, welche substantielle Einflüsse auf Land- und Forstwirtschaft ausüben können.

- Die Landwirtschaft kann zur Verringerung von THG-Emissionen beitragen

Die Landwirtschaft bietet zahlreiche Möglichkeiten, um THG-Emissionen zu vermindern. Am vielversprechendsten sind Maßnahmen in den Bereichen Wiederkäuerfütterung, Wirtschaftsdüngerbehandlung, Stickstoffeffizienz und Bioenergieproduktion. Dabei sollte gleichzeitig eine ressourcenschonende, ressourceneffiziente und nachhaltige Landwirtschaft gefördert werden. Das effiziente Nutzen knapper Ressourcen erfordert standortangepasste Konzepte, welche die Produktivität des jeweiligen Standorts optimal ausnutzen. Die Bewertung von Minderungsmaßnahmen sollte nach ganzheit-

lichen Grundsätzen erfolgen, wobei internationale Auswirkungen wie beispielsweise indirekte Landnutzungseffekte, berücksichtigt werden sollten.

- Erfolgreicher Ausbau landwirtschaftlicher Bioenergie auf Basis integrierter Ansätze

Beim Ausbau der Bioenergieproduktion ist ein integrativer Ansatz erfolgversprechend, der die Nahrungs-, Faserpflanzen- und Energieproduktion sowohl in der Fruchtfolge als auch in der Tierhaltung sowie generell bei allen Biomasseflüssen (Stichwort: „kaskadische Nutzung") integriert optimiert. Ein derartiger Ansatz kann Konkurrenzen um knappe Ressourcen, wie produktive Flächen oder Wasser, verringern und deutlich größere Bioenergiepotenziale liefern als eine isolierte Forcierung von Energiepflanzen für die Treibstoffproduktion in Konkurrenz zur Nahrungsproduktion. Zudem können derartige Systeme ressourcenschonend (Kreislaufwirtschaft) gestaltet werden, was vermutlich zu günstigen Emissionswerten führt. Eine Schlüsseltechnologie ist hierbei der Einsatz der anaeroben Vergärung (Biogasproduktion) zur Verwertung einer Vielzahl an Rest- und Abfallstoffen. Die Produktion flüssiger Treibstoffe kann, richtig in ein derartiges Konzept integriert, ebenfalls eine Rolle spielen. Bei nicht integrierten Systemen kann die Produktion fester Brennstoffe (z. B. in Kurzumtriebswäldern) für den Wärmemarkt oder Kraft-Wärme-Kopplung in der Regel zu niedrigeren Kosten deutlich höhere Energieerträge pro Hektar und Jahr und damit auch einen größeren Beitrag zum Klimaschutz liefern als Biokraftstoffe.

- Die Landwirtschaft steht vor der Herausforderung, sich an den Klimawandel anzupassen

Kurz- und langfristige Anpassungen in der landwirtschaftlichen Produktionstechnik und Landnutzung sind in allen Bereichen und Regionen unverzichtbar, da sich agrarklimatische Zonen verschieben. Verstärkte Begleitmaßnahmen zur Minderung von landwirtschaftlichen Produktionsrisiken auf institutioneller / politischer Ebene können helfen, eine ökonomisch und ökologisch nachhaltige Entwicklung der bäuerlichen Landwirtschaft zu erreichen. Operationelles Monitoring in kritischen Bereichen (z. B. Trockenheit, Schädlinge, Krankheiten) sollte verstärkt bzw. sichergestellt werden, um regionale Auswirkungen des Klimawandels rechtzeitig erkennen und bewerten zu können. Effiziente Wassernutzung und Bodenschutz bleiben zentrale Themen für eine nachhaltige und ressourcenschonende landwirtschaftliche Produktion. Dabei muss sichergestellt werden, dass Technologien zur Verfügung stehen (Technologieentwicklung) und von Seiten der LandnutzerInnen auch angewandt werden (Technologie-Diffusion).

- Die Forstwirtschaft spielt eine Schlüsselrolle für die Kohlenstoff- und Treibhausgasbilanz

Der österreichische Wald stellt derzeit in den meisten Jahren eine Kohlenstoffsenke dar, wobei die jährlich gespeicherte Kohlenstoffmenge in den letzten Jahren zurückging. Die THG-Emissionen aus Waldböden können durch Verbesserungen im Management verringert werden; besonders bei feuchten Standorten sowie sauren und stickstoffreichen Böden sind substanzielle Beiträge möglich. Eine Verringerung der Schlaggrößen kann die Emissionen ebenfalls verringern, ist allerdings derzeit nicht wirtschaftlich. Zu beachten ist, dass eine Steigerung des Holzeinschlags über einen Zeitraum von Jahren bis Jahrzehnten die Kohlenstoffsenke im Wald reduzieren kann. Die Gewinnung von Bioenergie aus forstlicher Biomasse kann helfen, die THG-Emissionen zu reduzieren, wenn sie in ein integriertes, differenziertes Nutzungskonzept eingebunden ist. Die Nutzung von Holz anstelle anderer, emissions- und energieintensiverer Materialien wie Beton, Stahl, etc. kann zu einer Verringerung der THG-Emissionen beitragen. Die größte Minderungswirkung für THG kann mit Hilfe von integrierten Bewirtschaftungs- und Nutzungskonzepten erzielt werden, bei denen das hoch qualitative Holz für möglichst langlebige Produkte verwendet wird und Schwachholz sowie Abfälle in der Produktionskette bzw. am Ende der Lebensdauer energetisch verwertet werden („kaskadische Nutzung").

- Anpassung stellt die Forstwirtschaft vor allem auf Grund der langfristigen Planungszeiträume vor eine große Herausforderung

Die üblichen Rotationsperioden von 70 bis 100 Jahren bedeuten, dass die Forstwirtschaft langfristig vorausdenken muss (vgl. Band 2, Kapitel 3). Bei der Anpassung spielen Fragen, wie geeignetes Saatgut (Herkünfte), sowie die Verwendung nicht heimischer Baumarten, wie etwa der Douglasie, eine wichtige Rolle. Hier bestehen potenziell Zielkonflikte mit dem Naturschutz, die zu beachten sind. Eine Vielzahl von Anpassungsmaßnahmen betreffen Fragen wie Trocken- oder Hitzestress, Schadinsekten, forstschädliche Pilze sowie Extremereignisse, wie Stürme. Stärkere Durchforstung kann helfen, die Verwundbarkeit von Beständen gegenüber Stürmen zu verringern und Holzreserven bis zur langfristig nachhaltigen Entnahmemenge zu mobilisieren. Durchforstung liefert vermehrt Schwachholz, das für die Papier- und Plattenindustrie sowie als Bioenergie geeignet ist. Förderung von forstlicher Bioenergie trägt zur Wirtschaftlichkeit der Durchforstung bei, da sie die Preise für Schwachholz tendenziell steigert. Zudem bringt Durchforstung eine Wertsteigerung der verbleibenden Bäume mit sich. Allerdings führt Durchforstung zumindest kurz- und

mittelfristig zu einer Verringerung der Kohlenstoffsequestrierung. Hier besteht die Herausforderung darin, Optima unter Abwägung zahlreicher Kriterien, wie Wirtschaftlichkeit, Risiko, THG-Bilanz, andere Ökosystemleistungen, etc., zu finden.

- Die THG-Reduktionspotenziale in der Wasserwirtschaft selbst sind gering[13]

Die THG-Emissionen der Wasserwirtschaft selbst sind nicht sehr hoch; ein Reduktionspotenzial besteht vor allem durch Energiegewinnung bei Abwasserreinigungsanlagen durch Biogastechnologien; dies vor allem bei größeren Anlagen ab etwa 50 000 Einwohnergleichwerten. Über THG-Emissionen in österreichischen Staubecken gibt es keine Untersuchungen, diese werden als gering eingeschätzt.

- Anpassung der Wasserwirtschaft an Hoch- und Niederwasser sowie Veränderungen im Sedimenthaushalt

Der Klimawandel stellt die Wasserwirtschaft vor eine Vielzahl von Herausforderungen, die jeweils spezifische Anpassungsmaßnahmen erfordern (vgl. Band 2, Kapitel 2). Das Hochwasserrisiko wird sich erhöhen und zeitlich verschieben; dem kann durch bauliche Maßnahmen, aber auch durch Veränderung der Bemessungswerte für Hochwässer begegnet werden. Niederwasser kann sowohl die Wasserqualität als auch die Schifffahrt beeinträchtigen und erfordert sowohl baulich-technische Maßnahmen als auch verbesserte Planungsgrundlagen. Erhöhtes Geschiebe- und Schwebstoffpotenzial kann eine Reihe an Problemen hervorrufen, etwa bei Wasserkraftanlagen aber auch für die Gewässerökologie. Es besteht ein breites Spektrum von Anpassungsmaßnahmen, die jeweils gemäß den spezifischen Erfordernissen zu planen sind. Durch Maßnahmen zur Verringerung von Erosion kann der Sedimenteintrag verringert werden, darunter fallen auch Maßnahmen wie Aufforstungen, welche Synergien mit THG-Minderung (Kohlenstoffsenke) aufweisen können. Maßnahmen zum Bodenschutz und zur Verbesserung des Bodenwasserhaushalts hätten auch positive Auswirkungen auf Bodenfruchtbarkeit und Bodenkohlenstoffbilanz. Die Frage, ob die Wasserkrafterzeugung der bestehenden Kraftwerke durch den Klimawandel beeinträchtigt wird, ist nicht eindeutig geklärt und bedarf weiterer Bearbeitung. Der Klimawandel könnte auch die Wasserversorgung negativ beeinflussen; die Vernetzung kleinräumiger Versorger untereinander bzw. mit größeren Wasserversorgungsnetzen stellt hier eine wichtige Anpassungsmaßnahme dar.

[13] Wasserkraft wird in, Band 3, Kapitel 3 behandelt.

- Anpassung von Naturschutz und Ökosystemmanagement an den Klimawandel erfordert integrative Ansätze

Der Klimawandel ist nur einer von mehreren Faktoren, welche einen Druck auf Ökosysteme und die Biodiversität ausüben und somit die zukünftige Fähigkeit der Ökosysteme in Frage stellen, essenzielle Ökosystemleistungen zu erbringen. Auch Land- und Forstwirtschaft sowie andere Eingriffe spielen hier eine wichtige Rolle. Anpassungsmaßnahmen können z. B. auch darin bestehen, bei vulnerablen Arten oder Ökosystemen nicht-klimabedingte Stressoren zu vermindern und so deren Resilienz zu steigern. Weitere Maßnahmen betreffen Neobiota, Grünraumgestaltung, Gestaltung und bessere Vernetzung von Schutzgebieten (Schaffung von Korridoren und Trittsteinen) sowie Anpassungen im Schutzgebietsmanagement. Der Berücksichtigung von Biodiversitäts- und Naturschutzkriterien beim Ausbau erneuerbarer Energie (Wasserkraft, Bioenergie) kommt große Bedeutung zu.

- Synergiepotenziale von Naturschutz und Vergrößerung von Kohlenstoffsenken im Wald und in Feuchtgebieten

Maßnahmen zur Erhaltung oder Vergrößerung von Kohlenstoffsenken bieten in vielen Fällen große Synergiepotenziale mit Natur- und Biodiversitätsschutz und können „win-win-Maßnahmen" darstellen. Extensiv genutzte land- und forstwirtschaftliche Flächen, besonders aber Feuchtgebiete (Moore, etc.) spielen eine wichtige Rolle als Kohlenstoffsenken und sind gleichzeitig aus Sicht des Natur- und Biodiversitätsschutzes höchst wertvoll. Durch ihre Erhaltung bzw. Wiederherstellung können Synergien zwischen Klima- und Naturschutz lukriert werden. Auch die Aufgabe oder Verringerung der forstwirtschaftlichen Nutzung von schwer zugänglichen Wäldern kann sowohl deren Naturschutzwert erhöhen, als auch zur Schaffung von Kohlenstoffsenken beitragen. Damit derartige Potenziale von den Akteuren im größeren Umfang angenommen werden, wäre eine Abgeltung der durch Nutzungsänderungen erhaltenen bzw. geschaffenen Ökosystemleistungen wie Naturschutz und Kohlenstoffsequestrierung nötig. Bei allen Formen öffentlicher Ausgleiche für Naturschutzleistungen ist zu bedenken, dass mit steigenden Marktpreisen auch die Opportunitätskosten der land- und forstwirtschaftlichen Produktion steigen.

- Verringerung des Fleischkonsums sowie der Verluste in der Lebensmittelversorgungs- und -konsumkette können maßgeblich zur THG-Reduktion beitragen

Ein markanter Teil der mit dem Konsum assoziierten Umweltfolgen und THG-Emissionen entfällt auf die Bereitstellung von Lebensmitteln. Tierische Produkte sind in der EU für etwa

die Hälfte der entstehenden THG-Emissionen durch Ernährung verantwortlich. Eine Verringerung des Fleischkonsums kann eine deutliche Senkung der THG-Emissionen bewirken. Ein Umstieg auf Produkte aus biologischer Landwirtschaft kann – neben zahlreichen weiteren ökologischen Vorteilen – die THG-Emissionen reduzieren, wobei allerdings die im Vergleich zur konventionellen Landwirtschaft teilweise geringeren Flächenerträge zu beachten sind. Empfehlenswert ist daher vor allem eine Kombination aus Umstieg auf Bio-Produkte und Verringerung des Konsums tierischer Lebensmittel. Eine Verringerung der Verluste in der Produktions- und -konsumkette von Lebensmitteln kann ebenfalls deutliche Verringerungen der THG-Emissionen bewirken.

- Systemische Effekte in der Landnutzung können große Auswirkungen auf die THG-Bilanz haben

Während die Emissionen in der Prozesskette für viele Produkte – auch für biogene Kraftstoffe und andere Formen von Bioenergie – relativ gut bekannt sind, bestehen große Unsicherheiten bezüglich der Effekte von Landnutzungsänderungen (direkter und indirekter Landnutzungswandel). Systemische Effekte beinhalten sowohl Synergien, als auch Trade-offs; sie können sowohl sinkende THG-Emissionen (z.B. durch Kohlenstoffsequestrierung) als auch stark steigende THG-Emissionen (z.B. durch Entwaldung auf Grund von Verschiebungen in der Landnutzung) hervorrufen. Handel mit Biomasse bzw. biomassebasierten Produkten spielt hier eine große Rolle, ist aber bisher nur unzureichend erforscht.

2.10 Forschungsbedarf
2.10 Research needs

Prioritärer Forschungsbedarf besteht hinsichtlich folgender Fragen:

- Auswirkungen des Klimawandels und empfehlenswerte Anpassungsoptionen in der Landwirtschaft sowie deren sozio-ökonomische Bewertung, vor allem im Bereich Schädlinge, Krankheiten bei Nutzpflanzen und -tieren, in der Pflanzenzüchtung, hinsichtlich der Produktionstechnik bei Nutzpflanzen (Fruchtfolge, Bodenbearbeitung, Düngung) und möglicher Anpassung an klimatische Extreme. Ausbau verfügbarer Datengrundlagen für entsprechende Modellanwendungen dringend notwendig, insbesondere für räumlich hoch aufgelöste Analysen.
- Umfassende Treibhausgasbilanzen von landwirtschaftlichen Bioenergiesystemen in Österreich unter Berücksichtigung von direkten und indirekten Landnutzungseffekten. Dabei sollten insbesondere integriert optimierte Systeme (Fruchtfolge, kaskadische Biomassenutzung) im Detail untersucht werden, da diese vermutlich eine besonders günstige THG-Bilanz pro Energieeinheit aufweisen. Die Flächeneffizienz (THG-Reduktion pro Flächeneinheit) sollte dabei vordringlich berücksichtigt werden und möglichst flächeneffiziente Systeme (z.B. Kurzumtrieb) prioritär beforscht werden.
- Umfassende Bewertung von THG-Minderungsoptionen in der Tierhaltung und regionale Analyse von deren Umsetzungspotenzial.
- Verbesserung der Informationsgrundlagen (forstökologisch, forstwirtschaftlich, statistisch, etc.) für eine integrierte Optimierung des Beitrags der Forstwirtschaft zum Klimaschutz unter Berücksichtigung der Kohlenstoffbilanz des Waldes.
- Erhebung von kaskadischen Nutzungspotenzialen sowie generell eine Optimierung der forstwirtschaftlichen Biomasseflüsse.
- Verbesserung des Verständnisses der Wechselwirkungen zwischen Forstmanagement und Kohlenstoffflüssen und -beständen im Wald sowie deren Wechselwirkung mit dem Klimawandel.
- Quantifizierung der THG-Emissionen aus Staubecken und gegebenenfalls Erarbeitung von Maßnahmen zu ihrer Verringerung.
- Verstärkte Forschung zu Ursachen des Biodiversitätsverlustes kann helfen, Natur- und Biodiversitätsschutz besser in die Landnutzungs- und Ressourcenpolitik zu integrieren und so effizientere Maßnahmen zum Schutz von Arten und Ökosystemen angesichts des Klimawandels zu entwickeln.
- Kosten und Potenziale der THG-Minderung im Bereich Land- und Forstwirtschaft, Natur- und Biodiversitätsschutz und Wasserwirtschaft sind bisher für Österreich zu wenig erforscht, besonders im Bereich von Implementierungsfragen und Wechselwirkungen zwischen Maßnahmen in den verschiedenen Sektoren.
- Potenzialabschätzungen für THG-Reduktion durch Ernährungsumstellung in Österreich, wobei vor allem Umsetzungsmöglichkeiten und -hemmnisse untersucht werden sollten sowie die Datengrundlagen zu Verlusten in der Lebensmittelversorgungs- und -verbrauchskette und die Erarbeitung von erfolgversprechenden Maßnahmen zur Reduktion der Verluste im Vordergrund stehen sollten.
- Forschung zu THG-Emissionen und anderen ökologischen Be- und Entlastungseffekten in der Vorleistungsket-

te bei gehandelten Produkten; Erforschung von Verschiebungseffekten und indirektem Landnutzungswandel.

- Beforschung von systemischen Wechselwirkungen in der Landnutzung, Erarbeitung von Strategien zur verstärkten Nutzung von Synergien und Vermeidung oder Abmilderung von Trade-offs.
- Weitere Reduktion der Unsicherheit von Klimamodellen und Forschung zum Einfluss von Unsicherheit auf betriebliche bis nationale politische Entscheidungen.

2.11 Literaturverzeichnis
2.11 References

AGES, 2012. Informationen zur Verwendung von importierter Soja bzw. Sojaextraktionsschrot als Futtermittel [WWW Document]. AGES. URL http://www.ages.at/ages/ernaehrungssicherheit/gvo/soja-futtermittel (accessed 11.21.13).

Alexandrov, V., Eitzinger, J., Cajic, V., Oberforster, M., 2002. Potential impact of climate change on selected agricultural crops in north-eastern Austria. Global Change Biology 8, 372–389. doi:10.1046/j.1354-1013.2002.00484.x

Alvarez, R., Alvarez, C.R., Lorenzo, G., 2001. Carbon dioxide fluxes following tillage from a mollisol in the Argentine Rolling Pampa. European Journal of Soil Biology 37, 161–166. doi:10.1016/S1164-5563(01)01085-8

AMA, 2013. Fleischkonsum in Österreich. [WWW Document]. ama.at | Das Informationsportal der Agrarmarkt Austria. URL http://www.ama-marketing.at/index.php?id=307 (accessed 11.21.13).

Amann, G., Schennach, R., Kessler, J., Maier, B., Terzer, S., 2010. Handbuch der Vorarlberger Waldgesellschaften. Gesellschaftsbeschreibungen und waldbaulicher Leitfaden. Amt der Vorarlberger Landesregierung, Abteilung Forstwesen, Bregenz.

Amon, B., Fröhlich, M., Amon, T., Zablatnik, B., Weissensteiner, R., 2007a. Tierhaltung und Wirtschaftsdüngermanagement in Österreich (Endbericht No. GZ LE.1.3.2/0066-II/1/2005). Im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.

Amon, B., Kryvoruchko, V., Amon, T., Zechmeister-Boltenstern, S., 2006. Methane, nitrous oxide and ammonia emissions during storage and after application of dairy cattle slurry and influence of slurry treatment. Agriculture, Ecosystems & Environment 112, 153–162. doi:10.1016/j.agee.2005.08.030

Amon, B., Moitzi, G., Schimpl, M., Kryvoruchko, V., Wagner-Alt, C., 2002. Methane, nitrous oxide and ammonia emissions from management of liquid manures (Final Report. On behalf of „Federal Ministry of Agriculture, Forestry, Environmental and Water Management“ and „Federal Ministry of Education“).

Amon, T., Amon, B., Kryvoruchko, V., Machmüller, A., Hopfner-Sixt, K., Bodiroza, V., Hrbek, R., Friedel, J., Pötsch, E., Wagentristl, H., Schreiner, M., Zollitsch, W., 2007b. Methane production through anaerobic digestion of various energy crops grown in sustainable crop rotations. Bioresource Technology 98, 3204–3212. doi:10.1016/j.biortech.2006.07.007

Amon, T., Bauer, A., Leonhartsberger, C., 2008. Integrierte Systeme–Sieben Fragen und Antworten zur Nutzung von Bioenergie. Wissenschaft & Umwelt Interdisziplinär, Energiezukunft 11, 162–171.

Amon, T., Kryvoruchko, V., Hopfner-Sixt, K., Amon, B., Ramusch, M., Milovanovic, D., Bodiroza, V., Sapik, R., Zima, J., Machmüller, A., 2006. Optimierung der Methanerzeugung aus Energiepflanzen mit dem Methanenergiewertsystem (Ein Projektbericht im Rahmen der Programmlinie Energie Systeme der Zukunft, Impulsprogramm Nachhaltig Wirtschaften. Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie No. Projektbericht 80/2006, Project Number 807736), Berichte aus Energie- und Umweltforschung 80/2006. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien.

Anderl, M., Böhmer, S., Gössl, M., Köther, T., Krutzler, T., Lampert, C., Poupa, S., Purzner, M., Stranner, G., Storch, A., Wiesenberger, H., Zechmeister, A., 2011c. Austria's National Air Emission Projections 2010-2030. Submission under the UN/ECE Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (Report No. REP-0343). Um, Wien.

Anderl, M., Braun, M., Böhmer, S., Gössl, M., Köther, T., Krutzler, T., Lampert, C., Pazdernik, K., Purzner, M., Poupa, S., Sporer, M., Storch, A., Stranner, G., Wiesenberger, H., Weiss, P., Zechmeister, A., Zethner, G., 2011b. GHG Projections and Assessment of Policies and Measures in Austria. Reporting under Decision 280/2004/EC. 15th March 2011 (0331). Umweltbundesamt Wien, Wien.

Anderl, M., Freudenschuß, A., Friedrich, A., Göttlicher, S., Köther, T., Kriech, M., Kuschel, V., Lampert, C., Pazdernik, K., Poupa, S., Purzner, M., Stranner, G., Schwaiger, E., Seuss, K., Weiss, P., Wieser, M., Zechmeister, A., Zethner, G., 2012. Austria's National Inventory Report 2011. Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and under the Kyoto Protocol (No. 0308). Umweltbundesamt, Wien.

Anonymos, 2012. Züchtungsziel Trockentoleranz: Fit für den Klimawandel [WWW Document]. Anonymos. URL http://www.biosicherheit.de/fokus/1430.trockentoleranz.html (accessed 10.30.13).

Araújo, M.B., Cabeza, M., Thuiller, W., Hannah, L., Williams, P.H., 2004. Would climate change drive species out of reserves? An assessment of existing reserve-selection methods. Global Change Biology 10, 1618–1626. doi:10.1111/j.1365-2486.2004.00828.x

Assmann, E., 1961. Waldertragskunde: organische Produktion, Struktur, Zuwachs und Ertrag von Waldbestaenden. BLV-Verlagsgesellschaft, München-Wien.

Audsley, E., Pearn, K.R., Simota, C., Cojocaru, G., Koutsidou, E., Rounsevell, M.D.A., Trnka, M., Alexandrov, V., 2006. What can scenario modelling tell us about future European scale agricultural land use, and what not? Environmental Science & Policy 9, 148–162. doi:10.1016/j.envsci.2005.11.008

Auer, I., Böhm, R., Mohnl, H., Potzmann, R., Schöner, W., Skomorowski, P., 2001. ÖKLIM – der digitale Klimaatlas Österreichs. Proceedings DACH Meteorologentagung 2001, Österreichische Beiträge zu Meteorologie und Geophysik, CD-ROM 27.

Auerswald, K., Mutchler, C.K., McGregor, K.C., 1994. The influence of tillage-induced differences in surface moisture content on soil erosion. Soil and Tillage Research 32, 41–50. doi:10.1016/0167-1987(94)90031-0

Austroclim, 2008. Identifikation von Handlungsempfehlungen zur Anpassung an den Klimawandel in Österreich, 1. Phase. BMLFUW, Wien.

Badura, H., Schneider, J., 2008. Durchleiten von Trübeströmen am Beispiel des Speichers Großsölk, in: Minor, H.-E. (Ed.), VAW Mitteilungen 207, Band 1. Presented at the Internationales Symposium „Neue Anforderungen an den Wasserbau", Eidgenössische Technische Hochschule (ETH), Zürich, pp. 283–295.

BAFU, UVEK, 2012. Anpassung an den Klimawandel: Wasserwirtschaft - Beitrag des Bundesamtes für Umwelt zur Anpassungsstrategie des Bundesrates. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Umwelt BAFU.

Baier, P., Pennerstorfer, J., Schopf, A., 2007. PHENIPS—A comprehensive phenology model of Ips typographus (L.) (Col., Scolytinae) as a tool for hazard rating of bark beetle infestation. Forest Ecology and Management 249, 171–186. doi:10.1016/j.foreco.2007.05.020

Ball, B.C., Scott, A., Parker, J.P., 1999. Field N2O, CO2 and CH4 fluxes in relation to tillage, compaction and soil quality in Scotland. Soil and Tillage Research 53, 29–39. doi:10.1016/S0167-1987(99)00074-4

Ball, B.C., Smith, K.A., Klemedtsson, L., Brumme, R., Sitaula, B.K., Hansen, S., Priemé, A., MacDonald, J., Horgan, G.W., 1997. The influence of soil gas transport properties on methane oxidation in a selection of northern European soils. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 102, 23309–23317. doi:10.1029/97JD01663

Baroni, L., Cenci, L., Tettamanti, M., Berati, M., 2006. Evaluating the environmental impact of various dietary patterns combined with different food production systems. Eur J Clin Nutr 61, 279–286. doi:10.1038/sj.ejcn.1602522

Barros, N., Cole, J.J., Tranvik, L.J., Prairie, Y.T., Bastviken, D., Huszar, V.L.M., del Giorgio, P., Roland, F., 2011. Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude. Nature Geosci 4, 593–596. doi:10.1038/ngeo1211

Battisti, A., Stastny, M., Netherer, S., Robinet, C., Schopf, A., Roques, A., Larsson, S., 2005. Expansion of geographic range in the pine processionary moth caused by increased winter temperatures. Ecological Applications 15, 2084–2096.

Bauer, A., Hrbek, R., Amon, B., Kryvoruchko, V., Bodiroza, V., Wagentristl, H., Zollitsch, W., Liebmann, B., Pfeffer, M., Friedl, A., Amon, T., 2007. Potential of biogas production in sustainable biorefinery concepts, in: ETA-Florence,Italy and WIP-Münschen, Germany. Presented at the 15th European Biomass Conference and Exhibition, ETA-Florence, Italy and WIP-Munich, Berlin, Germany.

Bauer, A., Leonhartsberger, C., Bösch, P., Amon, B., Friedl, A., Amon, T., 2010. Analysis of methane yields from energy crops and agricultural by-products and estimation of energy potential from sustainable crop rotation systems in EU-27. Clean Technologies and Environmental Policy 12, 153–161. doi:10.1007/s10098-009-0236-1

Bauer, K., Eitzinger, J., Kersebaum, K.C., 2009. Anpassungsstrategien bei Dauerkulturen., in: Eitzinger, J., Kersebaum, K.C., Formayer, H. (Eds.), Landwirtschaft im Klimawandel Auswirkungen und Anpassungsstrategien für die Land- und Forstwirtschaft in Mitteleuropa. Agrimedia, Clenze.

Bauer, K., Fardossi, A., 2008. Mit Maßnahmen rechtzeitig gegensteuern. Der W 14–17.

Baumgarten, A., Dersch, G., Hösch, J., Spiegel, H., Freudenschuß, A., Strauss, P., 2011. Bodenschutz durch umweltgerechte Landwirtschaft. AGES, BAW, Umweltbundesamt, Wien, Österreich.

Bazzoffi, P., Chisci, G., 1999. Tecniche di conservazione del suolo in vigneti e pescheti della collina cesenate. Rivista di Agronomia 3, 177–184.

Berg, B., Berg, M.P., Box, E., Bottner, P., Breymeyer, A., Calvo de Anta, R., Couteaux, M.M., Gallardo, A., Escudero, A., Kratz, W., Madeira, M., Mc Claugherty, C., Meentemeyer, V., Munoz, F., Piussi, P., Remacle, J., Virzo de Santo, A., 1993. Litter Mass Loss in Pine Forests of Europe: Relationship with Climate and Litter Quality, in: Breymeyer, A., Krawcyk, B., Kulikowski, R., Solon, J., Rosciszewski, M., Jaworska, B. (Eds.), Geography of Organic Matter Production and Decay. Scope Seminar, Szymbark, September 11-18, 1991. Polish Academy of Sciences, Warsaw, Poland, pp. 81–109.

BFW, 2012. Österreichs Wald. Bundesforschungszentrum für Wald, Wien.

BgBl, 1975. 440. Bundesgesetz vom 3. Juli 1975, mit dem das Forstwesen geregelt wird (Forstgesetz 1975).

Bielza Diaz, M., Conte, C.G., Gallego Pinilla, F.J., Stroblmair, J., Catenaro, R., Dittmann, C., 2009. Risk Management and Agricultural Insurance Schemes in Europe (No. Report EUR 23943), JRC Reference Reports. JRC European Commmission, ipsc, Ispra, Italy.

Bilotta, G.S., Brazier, R.E., 2008. Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota. Water Research 42, 2849–2861. doi:10.1016/j.watres.2008.03.018

Biodiversität und Klima - Konflikte und Synergien im Massnahmenbereich: ein Positionspapier der Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT), 2008. . Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT), Bern.

Bird, D.N., Pena, N., Frieden, D., Zanchi, G., 2012. Zero, one, or in between: evaluation of alternative national and entity-level accounting for bioenergy. GCB Bioenergy 4, 576–587. doi:10.1111/j.1757-1707.2011.01137.x

Blaschke, M., Bußler, H., Schmidt, O., 2008. Die Douglasie–(k) ein Baum für alle Fälle. LWF Wissen, Die Douglasie - Perspektiven im Klimawandel 59, 57–61.

Blöschl, G., Schöner, W., Kroiß, H., Blaschke, A.P., Böhm, R., Haslinger, K., Kreuzinger, N., Merz, R., Parajka, J., Salinas, J.L., Viglione, A., 2011. Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft – Ziele und Schlussfolgerungen der Studie für Bund und Länder. Österr Wasser- und Abfallw 63, 1–10. doi:10.1007/s00506-010-0274-2

Blöschl, G., Viglione, A., Heindl, H., 2008. Dynamik von Hochwasserbemessungsgrößen und Konsequenzen – Klimawandel, in: Habersack, H., Bürgel, J., Kanonier, A. (Eds.), Floodrisk II, Vertiefung Und Vernetzung Zukunftsweisender Umsetzungsstrategien Zum Integrierten Hochwassermanagement. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, p. TP 6.2.

Blum, A., 1989. Breeding methods for drought resistance, in: Jones, H.G., Flowers, T.G., Jones, M.B. (Eds.), Plants under Stress: Biochemistry, Physiology, and Ecology and Their Application to Plant Improvement, Society for Experimental Biology Seminar Series. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 197–215.

Blum, A., 2005. Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential—are they compatible, dissonant, or mutually exclusive? Crop and Pasture Science 56, 1159–1168.

Blum, A., 2011. Plant breeding for water-limited environments. Springer.

Blümel, S., 2012. Climate Change and Plant Health - increasing importance of bio control options for risk management of quarantine pests., in: IOBC-WPRS Bulletin. Presented at the Working Group „Biological Control of Fungal and Bac terial Plant Pathogens," Graz, pp. 11–14.

BMLFUW, 2000-2013. Grüner Bericht 1999, 2000, 2002, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012. Bericht über die Situation der österreichischen Land- und Forstwirtschaft. Grüner Bericht gemäß § 9 des Landwirtschaftsgesetzes BGBl. Nr. 375/1992. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.

BMLFUW, 2006. Nationaler Biomasseaktionsplan für Österreich. Begutachtungsentwurf. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.

BMLFUW, 2007. Hydrologischer Atlas Österreichs. 3. Lieferung. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, Österreich.

BMLFUW, 2010a. Policy Paper – 2. Entwurf: Auf dem Weg zu einer nationalen Anpassungsstrategie. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.

BMLFUW, 2010b. Nationaler Gewässerbewirtschaftungsplan 2009 – NGP 2009 (No. BMLFUW-UW.4.1.2/0011-I/4/2010). Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, Österreich.

BMLFUW, BMWFJ, 2010. Energiestrategie Österreich. Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, Bundesministerium für Land-und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.

BMLFWU, 2011. Kriterienkatalog Wasserkraft – Entwurf, Stand 11.4.2011. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.

Bodner, G., Himmelbauer, M., Loiskandl, W., Kaul, H.-P., 2010. Improved evaluation of cover crop species by growth and root factors. Agronomy for sustainable development 30, 455–464.

Bondeau, A., Smith, P.C., Zaehle, S., Schaphoff, S., Lucht, W., Cramer, W., Gerten, D., Lotze-Campen, H., Müller, C., Reichstein, M., Smith, B., 2007. Modelling the role of agriculture for the 20th century global terrestrial carbon balance. Global Change Biology 13, 679–706. doi:10.1111/j.1365-2486.2006.01305.x

Borron, S., 2006. Building resilience for an unpredictable future: how organic agriculture can help farmers adapt to climate change. Food and Agriculture Organizat ion of the United Nations, Rome, Italy.

Böttcher, H., Verkerk, P.J., Gusti, M., HavlÍk, P., Grassi, G., 2012. Projection of the future EU forest CO2 sink as affected by recent bioenergy policies using two advanced forest management models. GCB Bioenergy 4, 773–783. doi:10.1111/j.1757-1707.2011.01152.x

Boyd, J., Banzhaf, S., 2007. What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. Ecological Economics 63, 616–626. doi:10.1016/j.ecolecon.2007.01.002

Brang, P., Breznikar, A., Hanewinkel, M., Jandl, R., Maier, B., 2013. Managing Alpine Forests in a Changing Climate, in: Cerbu, G. (Ed.), Management Strategies to Adapt Alpine Space Forests to Climate Change Risks. InTech.

Brang, P., Bugmann, H., Bürgi, A., Mühlethaler, U., Rigling, A., Schwitter, R., 2008. Klimawandel als waldbauliche Herausforderung. Schweizerische Zeitschrift für das Forstwesen 159, 362–373.

Bright, R.M., Cherubini, F., Astrup, R., Bird, N., Cowie, A.L., Ducey, M.J., Marland, G., Pingoud, K., Savolainen, I., Strømman, A.H., 2012. A comment to „Large-scale bioenergy from additional harvest of forest biomass is neither sustainable nor greenhouse gas neutral“: Important insights beyond greenhouse gas accounting. GCB Bioenergy 4, 617–619. doi:10.1111/j.1757-1707.2012.01190.x

Buchgraber, K., Schaumberger, A., Pötsch, E.M., Krautzer, B., Hopkins, A., 2011. Grassland farming in Austria-status quo and future prospective., in: Grassland Farming and Land Management Systems in Mountainous Regions. Presented at the 16th Symposium of the European Grassland Federation (EGF), Gumpenstein, Austria,, pp. 13–24.

Büchsenmeister, R., 2011. Waldinventur 2007/09: Betriebe und Bundesforste nutzen mehr als den Zuwachs. BFW Praxisinformation 24, 6–9.

Butterbach-Bahl, K., Gunderson, P., Ambus, P., 2011a. Nitrogen processes in terrestrial ecosystems, in: Sutton, M.A., Howard, C.M., Erisman, J.W., Billen, G., Bleeker, A., Grennfelt, P., Grinsen, H. van, Grizetti, B. (Eds.), The European Nitrogen Assessment: Sources, Effects and Policy Perspectives, Earth and Environmental Sciences. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 99–125.

Butterbach-Bahl, K., Nemitz, E., Zaehle, S., Billen, G., Boeckx, P., Erisman, J.W., Garnier, J., Upstill-Goddard, R., Kreuzer, M., Oenema, O., 2011b. Nitrogen as a threat to the European greenhouse gas balance, in: Sutton, M.A., Howard, C.M., Erisman, J.W., Billen, G., Bleeker, A., Grennfelt, P., Grinsen, H. van, Grizetti, B. (Eds.), The European Nitrogen Assessment: Sources, Effects and Policy Perspectives, Earth and Environmental Sciences. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 434–462.

Calame, F., Troxler, J., Jeangros, B., 1992. Bestimmung der Wassermenge für eine optimale Beregnung von Naturwiesen im Goms (Oberwallis). Landwirtschaft Schweiz 5, 181–187.

Canh, T.T., Aarnink, A.J., Verstegen, M.W., Schrama, J.W., 1998a. Influence of dietary factors on the pH and ammonia emission of slurry from growing-finishing pigs. Journal of Animal Science 76, 1123–1130.

Canh, T.T., Aarnink, A.J.A., Mroz, Z., Jongbloed, A.W., Schrama, J.W., Verstegen, M.W.A., 1998b. Influence of electrolyte balance and acidifying calcium salts in the diet of growing-finishing pigs on urinary pH, slurry pH and ammonia volatilisation from slurry. Livestock Production Science 56, 1–13. doi:http://dx.doi.org/10.1016/S0301-6226(98)00148-1

Canh, T.T., Aarnink, A.J.A., Schutte, J.B., Sutton, A., Langhout, D.J., Verstegen, M.W.A., 1998. Dietary protein affects nitrogen excretion and ammonia emission from slurry of growing–finishing pigs. Livestock Production Science 56, 181–191. doi:http://dx.doi.org/10.1016/S0301-6226(98)00156-0

Canh, T.T., Schrama, J.W., Aarnink, A.J.A., Verstegen, M.W.A., Van’t Klooster, C.E., Heetkamp, M.J.W., 1998c. Effect of dietary fermentable fibre from pressed sugar-beet pulp silage on ammonia emission from slurry of growing-finishing pigs. Animal Science 67, 583–590. doi:http://dx.doi.org/10.1017/S1357729800033026

Canh, T.T., Sutton, A.L., Aarnink, A.J., Verstegen, M.W., Schrama, J.W., Bakker, G.C., 1998d. Dietary carbohydrates alter the fecal composition and pH and the ammonia emission from slurry of growing pigs. Journal of Animal Science 76, 1887–1895.

CBD, 2003. Interlinkages between biological diversity and climate change. Advice on the integration of biodiversity considerations into the implementation of the United Nations Framework Convention on Climate Change and its Kyoto protocol. (CBD Technical Series no. 10 No. 10). SCBD, CBD, Montre.

CEC, 2007. Grünbuch der Kommission vom 29. Juni 2007 über die anpassung an den Klimawandel in europa, Kom(2007). Commission of the European Communities (CEC), Brussels.

Ceschia, E., Béziat, P., Dejoux, J.F., Aubinet, M., Bernhofer, C., Bodson, B., Buchmann, N., Carrara, A., Cellier, P., Di Tommasi,

P., Elbers, J.A., Eugster, W., Grünwald, T., Jacobs, C.M.J., Jans, W.W.P., Jones, M., Kutsch, W., Lanigan, G., Magliulo, E., Marloie, O., Moors, E.J., Moureaux, C., Olioso, A., Osborne, B., Sanz, M.J., Saunders, M., Smith, P., Soegaard, H., Wattenbach, M., 2010. Management effects on net ecosystem carbon and GHG budgets at European crop sites. Agriculture, Ecosystems & Environment 139, 363–383. doi:10.1016/j.agee.2010.09.020

Cherubini, F., Peters, G.P., Berntsen, T., Strommann, A.H., Hertwich, E., 2011. CO2 emissions from biomass combustion for bioenergy: atmospheric decay and contribution to global warming. GCB Bioenergy 3, 413–426. doi:10.1111/j.1757-1707.2011.01102.x

Choudhary, M.A., Lal, R., Dick, W.A., 1997. Long-term tillage effects on runoff and soil erosion under simulated rainfall for a central Ohio soil. Soil and Tillage Research 42, 175–184. doi:http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987(97)00005-6

Christiansen, J.R., Vesterdal, L., Gundersen, P., 2012. Nitrous oxide and methane exchange in two small temperate forest catchments—effects of hydrological gradients and implications for global warming potentials of forest soils. Biogeochemistry 107, 437–454. doi:10.1007/s10533-010-9563-x

Chum, H., Faaij, A., Moreira, J., Berndes, G., Dhamija, P., Gabrielle, B., Eng, A.G., Lucht, W., Mapako, M., Cerutti, O.M., McIntyre, T., Minowa, T., Pingoud, K., 2011. Bioenergy, in: Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Seyboth, K., Matschoss, P., Kadner, S., Zwickel, T., Eickemeier, P., Hansen, G., Schlömer, S., von Stechow, C. (Eds.), IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 209–332.

Ciais, P., Schelhaas, M.J., Zaehle, S., Piao, S.L., Cescatti, A., Liski, J., Luyssaert, S., Le-Maire, G., Schulze, E.-D., Bouriaud, O., Freibauer, A., Valentini, R., Nabuurs, G.J., 2008. Carbon accumulation in European forests. Nature Geosci 1, 425–429. doi:10.1038/ngeo233

Coelho, S., Agbenyega, O., Agostini, A., Erb, K., Haberl, H., Hoogwijk, M., Lal, R., Lucon, O., Masera, O., Moreira, J.R., 2012. Land and water: linkages to bioenergy, in: Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, pp. 1459–1525.

Cordts, A., Duman, N., Grethe, H., Nitzko, S., Spiller, A., 2013. Auswirkungen eines verminderten Konsums von tierischen Produkten in Industrieländern auf globale Marktbilanzen und Preise für Nahrungsmittel. Schriftenreihe der Rentenbank 29, 103–135.

De Toffol, S., Engelhard, C., Rauch, W., 2008. Influence of climate change on the water resources in an alpine region. Water Sci. Technol. 58, 839–846. doi:10.2166/wst.2008.705

De Vries, M., de Boer, I.J.M., 2010. Comparing environmental impacts for livestock products: A review of life cycle assessments. Livestock Science 128, 1–11. doi:10.1016/j.livsci.2009.11.007

DelSontro, T., McGinnis, D.F., Sobek, S., Ostrovsky, I., Wehrli, B., 2010. Extreme methane emissions from a Swiss hydropower reservoir: Contribution from bubbling sediments. Environmental science & technology 44, 2419–2425. doi:10.1021/es9031369

Diercks, R., Heitefuss, R. (Eds.), 1990. Integrierter Landbau, 1. Auflage. ed. BLV Verlagsgesellschaft, DLG-Verlag, Landwirtschaftsverlag, Österreichischer Agrarverlag, Bugra, München, Münster-Hiltrup, Wien, Wabern-Bern.

Dillaha, T.A., Reneau, R.B., Mostaghimi, S., Lee, D., 1989. Vegetative filter strips for agricultural nonpoint source pollution control. Transactions of the ASAE 32.

Dirnböck, T., Essl, F., Rabitsch, W., 2011. Disproportional risk for habitat loss of high-altitude endemic species under climate change. Global Change Biology 17, 990–996. doi:10.1111/j.1365-2486.2010.02266.x

Dourmad, J.Y., Henry, Y., Bourdon, D., Quiniou, N., Guillou, D., 1993. Effect of growth potential and dietary protein input on growth performance, carcass characteristics and nitrogen output in growing-finishing pigs, in: Verstegen, M.W.A. (Ed.), Nitrogen Flow in Pig Production and Environmental Consequences: Proceedings of the First International Symposium on Nitrogen Flow in Pig Production and Environmental Consequences, Wageningen (Doorwerth), The Netherlands, 8-11 June 1993, European Association for Animal Production. EAAP Publication. Pudoc Scientific Publishers, pp. 206–211.

Drlik, S., Muhar, A., 2011. Handlungsfelder und Handlungsverantwortliche zur Klimawandelanpassung öffentlicher Grünanlagen in Städten. (Endbericht StartClim 2010 No. StartClim2010.A), Anpassung an den Klimawandel: Weitere Beiträge zur Erstellung einer Anpassungsstrategie für Österreich. BLMFUW, BMWF, BMWFJ, ÖBF, Wien.

Drösler, M., 2005. Trace gas exchange and climatic relevance of bog ecosystems, Southern Germany. Technische Universität München, akultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt, München.

Dullinger, S., Dirnböck, T., Grabherr, G., 2004. Modelling climate change-driven treeline shifts: relative effects of temperature increase, dispersal and invasibility. Journal of Ecology 92, 241–252. doi:10.1111/j.0022-0477.2004.00872.x

Easterling, W., Aggarwal, P.K., BAtima, P., Brandner, K., Erda, L., Howden, M., Kirilenko, A., Morton, J., Soussana, J.-F., Schmidhuber, S., Tubiello, F., 2007. Food, fibre and forest products. In Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability., in: Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., Van der Linden, P., Hanson, C.E. (Eds.), Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 273–313.

Eberstaller, J., Pinka, p., Knoblauch, H., Schneider, J., Badura, H., Jungwirth, M., Unfer, G., Wiesner, C., 2008. Nachhaltiges interdisziplinäres Feststoffmanagement an Stauräumen am Beispiel der Oberen Mur, in: Minor, E.H. (Ed.), Internationales Symposium „Neue Anforderungen an den Wasserbau", 11.-12. September 2008, Band 2, VAW Mitteilungen. Eigenverlag der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie ETH Zürich, Zürich, p. 516.

EC, 2007. Anpassung an den Klimawandel in Europa - Optionen für Maßnahmen der EU (No. KOMM(2007)354). Brüssel.

EC, 2009. How can you control climate change? Take Control! Additional suggestions [WWW Document]. URL ec.europa.eu/environment/climat/campaign/control/additional_en.htm (accessed 5.1.12).

EEA, 2007. CLC2006 technical guidelines (Technical report No. EEA Technical Report 17). European Environment Agency, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.

EEA, 2012. The European environment - state and outlook 2012 (Technical report). European Environment Agency, Office for Official Publications of the European Communities, Copenhagen.

Eitzinger, J., 2010a. Der Klimawandel – seine Auswirkungen auf agrarmeteorologische Aspekte und Anpassungsoptionen für die Landwirtschaft im europäischen Kontext. Ländlicher Raum 2, 10.

Eitzinger, J., 2007. Einfluss des Klimawandels auf die Produktionsrisiken in der österreichischen Landwirtschaft und mögliche Anpassungsstrategien. Ländlicher Raum 10.

Eitzinger, J., Freyer, B., Friedel, J., 2009. Landnutzungsformen mit besonderer Betonung auf Nachhaltigkeit, in: Eitzinger, J., Kersebaum, K.C., Formayer, H. (Eds.), Landwirtschaft Im Klimawandel: Auswirkungen Und Anpassungsstrategien Für Die Land- Und Forstwirtschaft in Mitteleuropa. Agrimedia, Clenze, pp. 247–253.

Eitzinger, J., Kersebaum, K.C., Formayer, H., 2009a. Landwirtschaft im Klimawandel: Auswirkungen und Anpassungsstrategien für die Land- und Forstwirtschaft in Mitteleuropa. Agrimedia, Clenze.

Eitzinger, J., Kubu, G. (Eds.), 2009. Impact of Climate Change and Adaptation in Agriculture. Extended Abstracts of the International Symosium, Boku-Met Report. University of Natural Ressources and Applied Life Sciences (BOKU), Vienna, Vienna.

Eitzinger, J., Kubu, G., Thaler, S., 2010. Konsequenzen des Klimawandels für das Ertragspotenzial und den Wasserhaushalt landwirtschaftlicher Pflanzenproduktion, in: ÖWAV (Ed.), Auswirkungen Des Klimawandels Auf Hydrologie Und Wasserwirtschaft in Österreich. Präsentation Der Aktuellen Studien. Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, Wien, pp. 181–191.

Eitzinger, J., Kubu, G., Thaler, S., Alexandrov, U., Utset, V., Mihailovic, D.T., Lalic, B., Trnka, M., Zalud, Z., Semeradova, D., Ventrella, D., Anastasiou, D.P., Medany, M., Altaher, S., Olejnik, J., Lesny, J., Nemeshko, N., Simota, C., Cojocaru, G., 2009b. Final report, including recommendations on adaptation measures considering regional aspects. Final scientific report of the ADAGIO Project: „Adaptation of agriculture in European regions at environmental risk under climate change“; Specific Support Action, FP6-2005-SSP-5-A, Proj.No.044210, Sixth Framework Programme (European Commission). (Final Report No. FP6-2005SSP-5-A). BOKU, Vienna.

Eitzinger, J., Kubu, G., Thaler, S., Trnka, M., 2009c. Der Klimawandel, seine absehbaren Folgen für die Landwirt- schaft in Oberösterreich und Anpassungsstrategien (Sonderbericht), in: Amt der Oö. Landesregierung (Ed.), Grüner Bericht 2008 - 30. Bericht Über Die Wirtschaftliche Und Soziale Lage Der Oberösterreichischen Land- Und Forstwirtschaft Im Jahr 2008. Amt der Oö. Landesregierung, Linz, pp. 97–106.

Eitzinger, J., Trnka, M., Semerádová, D., Thaler, S., Svobodová, E., Hlavinka, P., Siska, B., Takáč, J., Malatinská, L., Nováková, M., Dubrovský, M., Zalud, Z., 2013. Regional climate change impacts on agricultural crop production in Central and Eastern Europe – hotspots, regional differences and common trends. The Journal of Agricultural Science 787–812. doi:10.1017/S0021859612000767

Ellert, B.H., Janzen, H.H., 1999. Short-term influence of tillage on CO< sub> 2 fluxes from a semi-arid soil on the Canadian Prairies. Soil and Tillage Research 50, 21–32.

Ellwanger, G., Ssymank, A.C., Essl, F., Rabitsch, W., 2013. Bedeutung der Schutzgebietsnetze im Klimawandel, in: Essl, F., Rabitsch, W. (Eds.), Biodiversität und Klimawandel - Auswirkungen und Handlungsoptionen für den Naturschutz in Mitteleuropa. Springer, Berlin, pp. 342–352.

Englisch, M., Reiter, R., 2009. Standörtliche Nährstoff-Nachhaltigkeit bei der Nutzung von Wald-Biomasse. BFW Praxisinformation 18, 13–15.

Enquete-Kommission, 1994. Enquête-Kommission „Schutz derErdatmosphäre“ des Deutschen Bundestages (Hrsg.), Landwirtschaft und Ernährung - Quantitative Analysen und Fallstudien und ihre klimatische Relevanz., in: Landwirtschaft, Band1 ,Teilband II. Economica Verlag, Bonn.

Erb, K.-H., 2004. Land use–related Changes in Aboveground Carbon Stocks of Austria's Terrestrial Ecosystems. Ecosystems 7, 563–572. doi:10.1007/s10021-004-0234-4

Erb, K.-H., Gingrich, S., Krausmann, F., Haberl, H., 2008. Industrialization, Fossil Fuels, and the Transformation of Land Use: An Integrated Analysis of Carbon Flows in Austria 1830-2000. Journal of Industrial Ecology 12, 686–703. doi:10.1111/j.1530-9290.2008.00076.x

Erb, K.-H., Haberl, H., Plutzar, C., 2012a. Dependency of global primary bioenergy crop potentials in 2050 on food systems, yields, biodiversity conservation and political stability. Energy Policy 47, 260–269. doi:10.1016/j.enpol.2012.04.066

Erb, K.-H., Kastner, T., Luyssaert, S., Houghton, R.A., Kuemmerle, T., Olofsson, P., Haberl, H., 2013. Bias in the attribution of forest carbon sinks. Nature Clim. Change 3, 854–856. doi:10.1038/nclimate2004

Erb, K.-H., Mayer, A., Krausmann, F., Lauk, C., Plutzar, C., Steinberger, J., Haberl, H., 2012b. The interrelations of future global bioenergy potentials, food demand and agricultural technology, in: Gasparatos, A., Stromberg, P. (Eds.), Socioeconomic and Environmental Impacts of Biofuels: Evidence from Developing Nations. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 27–52.

Eriksson, L.O., Gustavsson, L., Hänninen, R., Kallio, M., Lyhykäinen, H., Pingoud, K., Pohjola, J., Sathre, R., Solberg, B., Svanaes, J., 2012. Climate change mitigation through increased wood use in the European construction sector—towards an integrated modelling framework. European Journal of Forest Research 131, 131–144. doi:10.1007/s10342-010-0463-3

Eshel, G., Martin, P.A., 2006. Diet, energy, and global warming. Earth Interactions 10, 1–17. doi:http://dx.doi.org/10.1175/EI167.1

Essl, F., 2007. From ornamental to detrimental? The incipient invasion of Central Europe by Paulownia tomentosa. Preslia 79, 377–389.

Essl, F., Milasowszky, N., Dirnböck, T., 2011. Plant invasions in temperate forests: Resistance or ephemeral phenomenon? Basic and Applied Ecology 12, 1–9. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.baae.2010.10.003

Eugster, W., DelSontro, T., Sobek, S., 2011. Eddy covariance flux measurements confirm extreme CH4 emissions from a Swiss hydropower reservoir and resolve their short-term variability. Biogeosciences 8, 2815–2831. doi:10.5194/bg-8-2815-2011

European Environment Agency, 2013. EEA Fast Track Service Precursor on Land Monitoring - Degree of soil sealing — European Environment Agency (EEA) [WWW Document]. URL http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/eea-fast-track-service-precursor-on-land-monitoring-degree-of-soil-sealing (accessed 2.28.14).

Evett, S.R., Schwartz, R.C., Casanova, J.J., Heng, L.K., 2012. Soil water sensing for water balance, ET and WUE. Agricultural Water Management 104, 1–9. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2011.12.002

FAO, 2003. Food energy - methods of analysis and conversion factors, FAO Food and Nutririon Paper 77. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rom.

FAO, 2011. World Livestock 2011. Livestock in food security. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.

FAO, 2012. Food Outlook. Global Market Analysis. Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations, Rome, Italy.

Fargione, J., Hill, J., Tilman, D., Polasky, S., Hawthorne, P., 2008. Land clearing and the biofuel carbon debt. Science 319, 1235–1238. doi:10.1126/science.1152747

Feichtinger, F., Stenitzer, E., 1995. Die Auswirkungen veränderter Klima-, Boden- und Bewirtschaftungsdaten auf die Nitratdynamik in der ungesättigten Zone – modellmäßige Sensitivitätsanalyse, in: Stofftransport Und Stoffbilanz in Der Ungesättigten Zone. Presented at the 5. Gumpensteiner Lysimetertagung, Bundesanstalt für Alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, Irdning, pp. 111–118.

Fiener, P., Auerswald, K., 2009. Effects of hydrodynamically rough grassed waterways on dissolved reactive phosphorus loads coming from agricultural watersheds. Journal of Environment Quality 38, 548–559. doi:10.2134/jeq2007.0525

Finkbeiner, M., 2013. Indirekte Landnutzungsänderungen in Ökobilanzen – wissenschaftliche Belastbarkeit und Übereinstimmung mit internationalen Standards. Verband der deutschen Biokraftstoffindustrie, Verband der ölsaatenverarbeitenden Industrie in Deutschland, Berlin.

Flachowsky, G., Lebzien, P., 2009. Comments on in vitro studies with methane inhibitors. Animal Feed Science and Technology 151, 337–339. doi:10.1016/j.anifeedsci.2009.02.003

Flamm, C., Engel, C., Pauk, J., Grabenweger, P., Reitner, H., Heinrich, M., Murer, E., 2012. Einfluss von Trockenheit auf pflanzenbauliche Parameter, Ertrag und Qualität bei Winterweizen., in: ALVA Arbeitsgemeinschaft für Lebensmittel-, V. a. (Ed.), Ernährung Sichern – Trotz Begrenzter Ressourcen. Tagungsband 2012. Presented at the ALVA Jahrestagung 2012, Lehr- und Forschungszentrum für Gartenbau, Schönbrunn, pp. 42–44.

Flanagan, D.C., Norton, L.D., Peterson, J.R., Chaudhari, K., 2003. Using polyacrylamide to control erosion on agricultural and disturbeds soils in rainfed areas. Journal of Soil and Water Conservation 58, 301–311.

Formayer, H., Kromb-Kolb, H., 2009a. Hochwasser und Klimawandel. Auswirkungen des Klimawandels auf Hochwasserereignisse in Österreich (Endbericht im Auftrag des World Wide Fund for Nature (WWF) No. BOKU-Met Report 7). Institut für Meteorologie (BOKU-Met) Department Wasser – Atmosphäre – Umwelt Universität für Bodenkultur Wien, Wien.

Formayer, H., Kromp-Kolb, H., 2009b. Auswirkungen des Klimawandels auf Hochwasserereignisse in Oberösterreich (Endbericht. Band 2 der Forschungsreihe „Auswirkungen des Klimawandels auf Oberösterreich" im Auftrag des Umweltlandesrates Rudi Anschober, Land Oberösterreich No. BOKU-Met Report 14). Institut für Meteorologie (BOKU-Met) Department Wasser – Atmosphäre – Umwelt Universität für Bodenkultur Wien, Wien.

Frank, S., Böttcher, H., Havlík, P., Valin, H., Mosnier, A., Obersteiner, M., Schmid, E., Elbersen, B., 2013. How effective are the sustainability criteria accompanying the European Union 2020 biofuel targets? GCB Bioenergy 5, 306–314. doi:10.1111/j.1757-1707.2012.01188.x

Frank, S., Schönhart, M., Schmid, E., 2011. Eine Kosteneffektivitätsanalyse für ausgewählte Agrarumweltmaßnahmen in Österreich, in: Hambrusch, J., Larcher, M., Oedl-Wieser, T. (Eds.), Jahrbuch Der Österreichischen Gesellschaft Für Agrarökonomie. facultas. wuv Universitätsverlag, Wien, pp. 53–63.

Freibauer, A., Drösler, M., Gensior, A., Schulze, E.-D., 2009. Das Potenzial von Wäldern und Mooren für den Klimaschutz in Deutschland und auf globaler Ebene. Natur und Landschaft 84, 20–25.

Freudenschuß, A., Sedy, K., Zethner, G., Spiegel, H., 2010. Arbeiten zur Evaluierung von ÖPUL-Maßnahmen hinsichtlich ihrer Klimawirksamkeit: Schwerpunkt agrarische Bewirtschaftung (No. REP-0290). Umweltbundesamt, Wien.

Freyer, B., 2003. Fruchtfolgen–konventionell, integriert, biologisch. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart 74.

Freyer, B., Surbock, A., Friedel, J.K., Heinzinger, M., 2007. Zukunft einer ökologisch genutzten Agrarlandschaft. GAIA-Ecological Perspectives for Science and Society 16, 158–160.

Freyer, B., Surböck, A., Heinzinger, M., Friedel, J.K., Schauppenlehner, T., Bernhardt, K.G., Brandenburg, C., Bruckner, A., Eitzinger, J., Garcia-Meca, M.I., Gerersdorfer, T., Holzner, W., Klik, A., Laube, W., Laubhann, D., Mayr, J., Mursch-Radlgruber, E., Pachinger, B., Prochazka, B., Puschenreiter, M., Stallegger, M., Reiter, A.S., Straka, U., Wenzel, W., Wieshammer, G., Böhmer, K., Brunner, N., Hann, P., Kienegger, M., Kromp, B., Frauenschuh, E.M., Meindl, P., Putz, B., Schmid, H., Trska, C., Wedenig, D., 2010. Biologischer Ackerbau im Trockengebiet. Ländlicher Raum 3/12, 1–12.

Friedlinghaus, M., Deumlich, D., Funk, R., Helming, K., Thiere, J., Völker, L., Winnige, B., n.d. Merkblätter zur Bodenerosion in Brandenburg (ZALF Bericht No. 27). ZALF, Müncheberg.

Fritsche, U., Eberle, U., Wiegmann, K., Schmidt, K., 2007. Treibhausgasemissionen durch Erzeugung und Verarbeitung von Lebensmitteln (Arbeitspapier), Öko-Institut e (Arbeitspapier). Öko-Institut e.V., Darmstadt/Hamburg.

Fuchs, M., 2005. Auswirkung von möglichen Klimaänderungen auf die Hydrologie verschiedener Regionen Österreichs (Dissertation). Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und Konstruktiven Wasserbau, Universität für Bodenkultur, Wien.

Fuglie, K., Heisey, P., King, J., Pray, C.E., Schimmelpfennig, D., 2012. The Contribution of Private Industry to Agricultural Innovation. Science 338, 1031–1032. doi:10.1126/science.1226294

Fuglie, K.O., Wang, S.L., 2013. New Evidence Points to Robust but Uneven Productivity Growth in Global Agriculture. Global Journal of Emerging Market Economies 5, 23–30. doi:10.1177/0974910112469266

Gadermaier, F., Berner, A., Fließbach, A., Friedel, J.K., Mäder, P., 2012. Impact of reduced tillage on soil organic carbon and nutrient budgets under organic farming. Renewable Agriculture and Food Systems 27, 68–80.

Garrido, A., Bielza, M., Rey, D., Minguez, I., Ruiz-Ramos, M., 2010. Insurance as an Adaptation to Climate Variability in Agriculture (Working Paper No. 002). Centre for the Management of Agricultural and Environmental Risks, ceigram -Centro de Estudios e Investigación para la gestión de Riesgos Agrarios y Medioambientales, Madrid.

Gebhardt, T., Grams, T., Häberle, K.-H., Matyssek, R., Schulz, C., Grimmeisen, W., Ammer, C., 2012. Helfen Durchforstungen bei Trockenheit? Erste Ergebnisse eines Versuchs zur Verbesserung der Wasserversorgung junger Fichtenbestände. LWF aktuell 8–10.

Gerersdorfer, T., Eitzinger, J., Bahrs, E., 2009. Landscape structures (hedgerows) as adaptation measure to climate change in semi-arid regions, in: Eitzinger, J., Kubu, G. (Eds.), Impact of Climate Change and Adaptation in Agriculture. Extended Abstracts of the International Symosium, Boku-Met Report. University of Natural Ressources and Applied Life Sciences (BOKU), Vienna, Vienna, pp. 130–134.

Gessl, C., 2013. Teller, Trog, Trank - eine Mengenbetrachtung. Entwicklung der österreichischen Getreidebilanz., Österreichischer Biomasseverband.

Gingrich, S., Erb, K.-H., Krausmann, F., Gaube, V., Haberl, H., 2007. Long-term dynamics of terrestrial carbon stocks in Austria: a comprehensive assessment of the time period from 1830 to 2000. Regional Environmental Change 7, 37–47.

Ginkel, M. van, Calhoun, D.S., Gebeyehu, G., Miranda, A., Tianyou, C., Lara, R.P., Trethowan, R.M., Sayre, K., Crossa, J., Rajaram, S., 1998. Plant traits related to yield of wheat in early, late, or continuous drought conditions. Euphytica 100, 109–121. doi:10.1023/A:1018364208370

Glauninger, J., 2011. Neue Unkräuter – Wissen fehlt noch. BIO Austria Zeitung 2, 16–17.

GLP, 2005. GLobal Land Project. Science Plan and Implementation Strategy (No. IGBP Report 53/IHDP Report No. 19). GBP Secretariat, Stockholm.

Gollner, G., Schweinzer, A., Friedel, J.K., 2012. Standortangepasste, leguminosenbasierte Fruchtfolgen und effiziente Nährstoffkreisläufe zum Erhalt von Bodenfruchtbarkeit und Etragsstabilität sowie zur Verringerung von Treibhausgasemissionen (Poster), in: Gerzabek, M.H. (Ed.), Quo Vadis, Universitäten? [Festsymposium 140 Jahre Universität Für Bodenkultur Wien „Quo Vadis, Universitäten?“, Universität Für Bodenkultur, 1190 Wien, Muthgasse 18, 2.-3. Februar 2012]. Universität für Bodenkultur, Wien, pp. 130–132.

Gottfried, M., Pauli, H., Futschik, A., Akhalkatsi, M., Barancok, P., Alonso, J.L.B., Coldea, G., Dick, J., Erschbamer, B., Kazakis, G., Krajci, J., Larsson, P., Mallaun, M., Michelsen, O., Moiseev, M., Moiseev, P., Molau, U., Merzouki, A., Nagy, L., Nakhutsrishvili, G., Pedersen, B., Pelino, G., Puscas, M., Rossi, G., Stanisci, J.-P., Theurillat, Tomaselli, Villar, L., Vittoz, P., Vogiatzakis, I., Grabherr, G., 2012. Continent-wide response of mountain vegetation to climate change. Nature Climate Change Letter 2, 111–115. doi:10.1038/nclimate1329

Götzl, M., Schwaiger, E., Sonderegger, G., Süßenbacher, E., 2011d. Ökosystemleistungen und Landwirtschaft - Erstellung eines Inventars für Österreich (Report No. REP-0355). Umweltbundesamt, Wien.

Graiss, W., Krautzer, B., Pötsch, E.M., Hopkins, A., 2011. Suitability of alternative grass species for grassland management in Austria under changing climatic conditions., in: Grassland Farming and Land Management Systems in Mountainous Regions. Proceedings of the 16th Symposium of the European Grassland Federation, Gumpenstein, Austria, 29th-31st August, 2011. pp. 440–442.

Gril, J.J., Canler, J.P., Carsoulle, J., 1989. The benefits of permanent grass and mulching for limiting runoff and erosion in vineyards. Experimentations using rainfall simulations in the Beaujolais, in: Schwertmann, U., Rickson, R.J., Auerswald, K. (Eds.), Soil Erosion Protection Measures in Europe. Proceedings of the European Community Workshop on Soil Erosion Protection, Freising, FR Germany, May 24-26,1988, Soil Technology Series. Catena Verlag, Cremlingen-Destedt, Deutschland, pp. 157–66.

Gröbmaier, J., Gandorfer, M., Heißenhuber, A., 2009. Handlungsmöglichkeiten zur Beeinflussung des durch den Klimawandel induzierten Risikos in der Landwirtschaft, in: Eitzinger, J., Kersebaum, K.C., Formayer, H. (Eds.), Landwirtschaft Im Klimawandel: Auswirkungen Und Anpassungsstrategien Für Die Land- Und Forstwirtschaft in Mitteleuropa. Agrimedia, Clenze, pp. 219–235.

Grummer, J., 2009. Einfluß des Klimawandels auf die Tiergesundheit, in: Eitzinger, J., Kersebaum, K.C., Formayer, H. (Eds.), Landwirtschaft Im Klimawandel: Auswirkungen Und Anpassungsstrategien Für Die Land- Und Forstwirtschaft in Mitteleuropa. Agrimedia, Clenze, pp. 219–235.

Grünig, A., Steiner, G.M., 2010. Moore: vom Aschenputtel zur Prinzessin. Natur & Land 96, 4–11.

Grunwald, D., Fender, A.-C., Erasmi, S., Jungkunst, H.F., 2012. Towards improved bottom-up inventories of methane from the European land surface. Atmospheric Environment 51, 203–211. doi:10.1016/j.atmosenv.2012.01.025

GSchV, 1998. Schweizer Gewässerschutzverordnung (GSchV) 814.201.

Gschwantner, T., Prskawetz, M., 2005. Sekundäre Nadelwälder in Österreich. BFW Praxisinformation 6, 11–14.

Guérin, F., Abril, G., Richard, S., Burban, B., Reynouard, C., Seyler, P., Delmas, R., 2006. Methane and carbon dioxide emissions from tropical reservoirs: Significance of downstream rivers. Geophysical Research Letters 33. doi:10.1029/2006GL027929

Gundersen, P., Christiansen, J.R., Alberti, G., Brüggemann, N., Castaldi, S., Gasche, R., Kitzler, B., Klemedtsson, L., Lobo-do-Vale, R., Moldan, F., Rütting, T., Schleppi, P., Weslien, P., Zechmeister-Boltenstern, S., 2012. The greenhouse gas exchange responses of methane and nitrous oxide to forest change in Europe. Biogeosciences Discussions 9, 6129–6168.

Gustavsson, L., Sathre, R., 2011. Energy and CO2 analysis of wood substitution in construction. Climatic change 105, 129–153.

Haas, W., Weisz, U., Pallua, I., Hutter, H.-P., Essl, F., Knoflacher, H., Formayer, H., Gerersdorfer, T., Balas, M., 2010. Handlungsempfehlungen zur Anpassung an den Klimawandel in Österreich, Aktivitätsfelder: Gesundheit, Natürliche Ökosysteme/Biodiversität und Verkehrsinfrastruktur (Im Auftrag des Klima- und Energiefonds,). AustroClim, Wien.

Haberl, H., 2013. Net land-atmosphere flows of biogenic carbon related to bioenergy: towards an understanding of systemic feedbacks. Global Change Biology Bioenergy 5, 351–357. doi:10.1111/gcbb.12071

Haberl, H., Beringer, T., Bhattacharya, S.C., Erb, K.-H., Hoogwijk, M., 2010. The global technical potential of bio-energy in 2050 considering sustainability constraints. Current Opinion in Environmental Sustainability 2, 394–403. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.cosust.2010.10.007

Haberl, H., Erb, K.-H., Krausmann, F., Adensam, H., Schulz, N.B., 2003. Land-use change and socio-economic metabolism in Austria–Part II: land-use scenarios for 2020. Land use policy 20, 21–39. doi:http://dx.doi.org/10.1016/S0264-8377(02)00049-2

Haberl, H., Erb, K.-H., Krausmann, F., Bondeau, A., Lauk, C., Müller, C., Plutzar, C., Steinberger, J.K., 2011. Global bioenergy potentials from agricultural land in 2050: Sensitivity to climate change, diets and yields. Biomass and Bioenergy 35, 4753–4769.

Haberl, H., Geissler, S., 2000. Cascade utilization of biomass: strategies for a more efficient use of a scarce resource. Ecological Engineering 16, 111–121. doi:http://dx.doi.org/10.1016/S0925-8574(00)00059-8

Haberl, H., Kastner, T., Schaffartzik, A., Ludwiczek, N., Erb, K.-H., 2012a. Global effects of national biomass production and consumption: Austria's embodied HANPP related to agricultural biomass in the year 2000. Ecological Economics 84, 66–73. doi:10.1016/j.ecolecon.2012.09.014

Haberl, H., Schulze, E.-D., Körner, C., Law, B.E., Holtsmark, B., Luyssaert, S., 2013. Response: complexities of sustainable forest use. GCB Bioenergy 5, 1–2. doi:10.1111/gcbb.12004

Haberl, H., Sprinz, D., Bonazountas, M., Cocco, P., Desaubies, Y., Henze, M., Hertel, O., Johnson, R.K., Kastrup, U., Laconte, P., Lange, E., Novak, P., Paavola, J., Reenberg, A., van den Hove, S.,

Vermeire, T., Wadhams, P., Searchinger, T., 2012b. Correcting a fundamental error in greenhouse gas accounting related to bioenergy. Energy Policy 45, 18–23. doi:10.1016/j.enpol.2012.02.051

Habersack, H., 2009. Feststoffhaushalt, Flussmorphologie, ökologischer Zustand und Hochwasserschutz. Hintergrundpapier NGP.

Habersack, H., Bürgel, J., Kanonier, A., 2009. FloodRisk II. Vertiefung und Vernetzung zukunftsweisender Umsetzungsstrategien zum integrierten Hochwassermanagement (Synthesebericht).

Habersack, H., Hauer, C., Schober, B., Dister, E., Quick, I., Harms, O., Döpke, M., Wintz, M., Piquette, E., Tiefenbach, M., Schwarz, U., 2008. Flood risk reduction by preserving and restoring river floodplains (PRO_Floodplain). ERA-NET CRUE Funding Initiative on Flood Risk Management Research (CRUE Research Report No. I-3). CRUE Funding Initiative on Flood Risk Manag ement Research, London.

Habersack, H., Hengl, M., Huber, B., Lalk, P., Tritthart, M., 2011a. ÖWAV Arbeitsbehelf Fließgewässermodellierung–Feststofftransport und Gewässermorphologie. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft Umwelt und Wasserwirtschaft, Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV), Wien.

Habersack, H., Schnedier, J., Bogner, K., Markart, G., Kohl, B., Badura, H., Fenicia, F., Gamerith, B., Koboltschnig, G., Mayr, P., Mischker, J., Öhlböck, K., Preinsdorfer, S., Santner, P., Wakonig, B., Botthof, M., Fieger, S., 2002. Water resources management in a changing environment: the impact of sediment on sustainability – WARMICE. Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiver Wasserbau, Universität für Bodenkultur, Wien., Wien.

Habersack, H., Schneider, J., 2001. Reservoir sedimentation – catchment wide analysis of erosion, transport, deposition and remobilization., in: Proceedings of the Hydro 2001 (Hydropower and Dams) Conference. Presented at the Hydro 2001 (Hydropower and Dams), Italy, pp. 727–736.

Habersack, H., Schober, B., Krapesch, G., Jäger, E., Muhar, S., Poppe, M., Preis, S., Weiss, M., Hauer, C., 2010. Neue Ansätze im integrierten Hochwassermanagement: Floodplain Evaluation Matrix FEM, flussmorphologischer Raumbedarf FMRB und räumlich differenziertes Vegetationsmanagement egetationsmanagement VeMaFLOOD. ÖWAV (Österreichische Wasser-und Abfallwirtschaft) 62, 15–21.

Habersack, H., Wagner, B., Hauer, C., Jäger, E., 2012. Wasserkraft in Österreich — aktueller Bestand und Decision Support System (DSS Wasserkraft). OEWAW 64, 336–343. doi:10.1007/s00506-012-0405-z

Habersack, H., Wagner, B., Hauer, C., Jäger, E., Krapesch, G., Strahlhofer, L., Volleritsch, M., Holzapfel, P., Schmutz, S., Schinegger, R., 2011b. DSS_KLIM: EN: Entwicklung eines Decision Support Systems zur Beurteilung der Wechselwirkungen zwischen Klimawandel, Energie aus Wasserkraft und Ökologie (Endbericht). Studie im Auftrag der Kommunalkredit Austria AG, gefördert vom Klima- und Energiefonds, Wien.

Hackl, E., Zechmeister-Boltenstern, S., Kandeler, E., 2000. Nitrogen dynamics in different types of pasture in the Austrian Alps. Biol Fertil Soils 32, 321–327. doi:10.1007/s003740000255

Haines-Young, R., Potschin, M., 2011. Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) : 2011 Update (Paper prepared for discussion at the expert meeting on ecosystem accounts organised by the UNSD, the EEA and the World Bank, London, December 2011 No. EEA/BSS/07/007). European Environment Agency, UK.

Hanewinkel, M., Cullmann, D.A., Schelhaas, M.-J., Nabuurs, G.-J., Zimmermann, N.E., 2013. Climate change may cause severe loss in the economic value of European forest land. Nature Clim. Change 3, 203–207. doi:10.1038/nclimate1687

Hänggi, P., Plattner, C., 2009. Projekt Klimaänderung und Wasserkraftnutzung. Geographisches Institut Universität Bern Netzwerkwasser im Berggebiet, Davos, Bern, Davos.

Hartl, W., Erhart, E., Feichtinger, F., 2012. Humusaufbau auf Ackerflächen im Zusammenhang mit Klima-, Boden- und Gewässerschutz. 3. Umweltökologisches Symposium „Wirkung von Maßnahmen zum Boden- und Gewässerschutz", 6.-7.3.2012, LFZ Raumberg-Gumpenstein, Irdning 39–44.

Harvey, B.C., White, J.L., 2008. Use of Benthic Prey by Salmonids under Turbid Conditions in a Laboratory Stream. Transactions of the American Fisheries Society 137, 1756–1763. doi:10.1577/T08-039.1

Hasenauer, H., 2012. Die Bedeutung der Waldwirtschaft für den Kohlenstoffhaushalt., in: Österreichischer Biomasseverband (Ed.), Energie Aus Der Region, Zukunftsfähig Und Nachhaltig, Österreichischer Biomasseverband. pp. 26–33.

Hauenstein, W., 2008. Wasserkraft und Klimawandel, in: Verein für Ökologie und Umweltforschung (Ed.), Stromwirtschaft Im Klimawandel. Auswirkungen Der Klimaveränderung Auf Die Erzeugung von Strom., Tagungsband. Presented at the Umwelttagung des Vereins für Ökologie und Umweltforschung, Passau, pp. 33–50.

Hauer, C., Unfer, G., Holzmann, H., Schmutz, S., Habersack, H., 2013. The impact of discharge change on physical instream habitats and its response to river morphology. Climatic Change 116, 827–850. doi:10.1007/s10584-012-0507-4

Hauer, W., FH Analytik, 2011. Lebensmittelabfälle im Haus-, Gewerbe- und Sperrmüll in Österreich 2010. Korneuburg.

Hauk, E., Schadauer, K., 2009. Instruktionen für die Feldarbeit der Österreichischen Waldinventur 2007–2009. Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Wien 201.

Hennegriff, W., Kolokotronis, V., Weber, H., Bartels, H., 2006. Klimawandel und Hochwasser: Erkenntnisse und Anpassungsstrategien beim Hochwasserschutz. KA - Abwasser, Abfall 53, 770–779.

Heumesser, C., Fuss, S., Szolgayová, J., Strauss, F., Schmid, E., 2012. Investment in Irrigation Systems under Precipitation Uncertainty. Water Resour Manage 26, 3113–3137. doi:10.1007/s11269-012-0053-x

Hofmann, I., 2002. Ernährungsempfehlungen und Ernährungsweisen – Auswirkungen auf Gesundheit, Umwelt und Gesellschaft (Habilitationsschrift Fachbereich Agrarwissenschaften, Ökotrophologie und Umweltmanagement). Justus-Liebig-Universität Gießen, Gießen.

Höltinger, S., Schmidt, J., Schmid, E., 2012. The Green Biorefinery Concept: Optimal plant locations and sizes for Austria. Jahrbuch der ÖGA (Österreichische Gesellschaft für Agrarökonomie) 21/1, 147–156.

Holtsmark, B., 2012. Harvesting in boreal forests and the biofuel carbon debt. Climatic Change 112, 415–428. doi:10.1007/s10584-011-0222-6

Holzapfel, G., Weihs, P., Florineth, F., 2012. Influences of Riparian Vegetation on the Ecology of River Systems - Shading Effects of Riparian Vegetation, in: ISE 2012 Proceedings. Presented at the 9th international Symposium on Ecohydraulics 2012, Institute of Water Management, Hydrology and Hydraulic Engineering - University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna, Austria.

Holzmann, H., Lehmann, T., Formayer, H., Haas, P., 2010. Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf Hochwasser und Wasserhaushaltskomponenten ausgewählter Einzugsgebiete

in Österreich. Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft 62, 7–14. doi:10.1007/s00506-009-0154-9

Höper, H., 2007. Freisetzung von Treibhausgasen aus deutschen Mooren. Telma 37, 85–116.

Hopfner-Sixt, K., Simic, V., Amon, T., 2007. Energie aus Biogas. Spektrum der Wissenschaft Spezial 1, 58–63.

Hörtenhuber, S., Lindenthal, T., Amon, B., Markut, T., Kirner, L., Zollitsch, W., 2010. Greenhouse gas emissions from selected Austrian dairy production systems—model calculations considering the effects of land use change. Renewable Agriculture and Food Systems 25, 316–329. doi:10.1017/S1742170510000025

Hörtenhuber, S., 2012. Berechnungen zu den Auswirkungen einer reduzierten Lebendmasse von Milchkühen sowie eines steigenden Viehbestands. Berechnungen für die Task-Force „Tierhaltung". BMLFUW, Wien.

Hörtenhuber, S.J., Lindenthal, T., Zollitsch, W., 2011. Reduction of greenhouse gas emissions from feed supply chains by utilizing regionally produced protein sources: the case of Austrian dairy production. Journal of the Science of Food and Agriculture 91, 1118–1127. doi:10.1002/jsfa.4293

Horton, P., Schaefli, B., Mezghani, A., Hingray, B., Musy, A., 2006. Assessment of climate-change impacts on alpine discharge regimes with climate model uncertainty. Hydrological Processes 20, 2091–2109. doi:10.1002/hyp.6197

Houghton, R. a., Goodale, C. l., 2004. Effects of Land-Use Change on the Carbon Balance of Terrestrial Ecosystems, in: Defries, R.S., Asner, G.P., Houghton, R.A. (Eds.), Ecosystems and Land Use Change. American Geophysical Union, pp. 85–98.

Hudiburg, T.W., Law, B.E., Wirth, C., Luyssaert, S., 2011. Regional carbon dioxide implications of forest bioenergy production. Nature Climate Change 1, 419–423. doi:10.1038/nclimate1264

Hülsbergen, K.-J., 2011. Sequestrierung landwirtschaftlicher Böden. Humuswirtschaft & Kompost aktuell 1/2, 1–5.

Huntley, B., Green, R.E., Collingham, Y.C., Willis, S.G., 2007. A climatic atlas of European breeding birds. Lynx Edicions, Barcelona.

IFOAM, 2011. Principles of organic agriculture. Preamble. International Federation of Organic Farming Movements, Bonn.

Immler, T., Tiefenbacher, C., Muck, M., 2006. Waldschutzsituation im Herbst 2006: Borkenkäfer halten Waldschützer in Atem. Forstschutz Aktuell 37, 8–10.

IPCC, 1997. Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. IPCC/OECD/IEA, Paris, France.

IWAG-TU, 2012. Forschungsbereiche für Wassergütewirtschaft und Biologie und Chemie des Wassers: ReLaKO [WWW Document]. URL http://iwr.tuwien.ac.at/wasser/forschung/arbeits-und-forschungsschwerpunkte/klimawandel-und-wasserwirtschaft/relako.html (accessed 11.26.13).

Jandl, R., 2011. Land use form affects the soil carbon pool – Case study Austria. EGU General Assembly 2011 13, 1.

Jandl, R., Enlisch, M., Reiter, R., Schindlbacher, A., Ledermann, T., Gschwantner, T., 2014. Assessing temporal soil carbon changes by means of soil inventories and a simulation model. Forest Ecology and Management submitted.

Jandl, R., Schüler, S., 2012. Anpassung der Waldbewirtschaftung an den Klimwandel. BFW Praxisinformation, Adaptives Management angesichts eines Klimawandel 30, 29–30.

Jandl, R., Schüler, S., Schindlbacher, A., Tomiczek, C., 2013. Forests, Carbon Pool, and Timber Production, in: Lal, R., Lorenz, K., Hüttl, R.F., Schneider, B.U., Braun, J. von (Eds.), Ecosystem Services and Carbon Sequestration in the Biosphere. Springer Netherlands, pp. 101–130.

Jasser, C., Diwold, G., 2011. Baumartenwahl im Mühlviertel. Empfehlungen für das Wuchsgebiet Mühlviertel und Sauwald. Amt der Oö. Landesregierung, Direktion für Landesplanung, Wirtschaftliche und Ländliche Entwicklung, Abt. Land- und Forstwirtschaft, Linz.

Jongebreur, A., Monteny, G., Ogink, N., 2005. Livestock production and emissions of volatile gases., in: Kuczyński, T., Dämmgen, U., Webb, J., Myczko, A. (Eds.), Emissions from European Agriculture. Wageningen Academic Publishers, Wageningen.

JRC, 2010. Evaluation of the livestock sector's contribution to the EU greenhouse gas emissions (GGELS). (Final R). Joint Research Centre, European Commission, Brussels.

Jungmeier, M., 2010. Untersuchungen über die Viröse Gelbverzwergung (barley yellow dwarf virus) an Wintergerste (Hordeum vulgare L.) in der Vegetationsperiode 2008/2009 (Masterarbeit). Universität für Bodenkultur Wien, Wien.

Jungwirth, M., Haidvogl, G., Moog, O., Muhar, S., Schmutz, S., 2003. Angewandte Fischökologie an Fließgewässern. UTB, Stuttgart.

Kalt, G., Kranzl, L., Adensam, H., Zawichowkski, M., Stürmer, B., Schmid, E., 2010a. Strategien für eine nachhaltige Aktivierung landwirtschaftlicher Bioenergie-Potenziale (Endbericht). Technische Universität Wien im Auftrag von Kli:en, Wien.

Kalt, G., Kranzl, L., Haas, R., April 2010b. Long-term strategies for an efficient use of domestic biomass resources in Austria. Biomass and Bioenergy 34, 449–466. doi:10.1016/j.biombioe.2009.12.009

Kampschreur, M.J., Temmink, H., Kleerebezem, R., Jetten, M.S.M., van Loosdrecht, M.C.M., 2009. Nitrous oxide emission during wastewater treatment. Water Research 43, 4093–4103. doi:10.1016/j.watres.2009.03.001

Kapeller, S., Lexer, M.J., Geburek, T., Hiebl, J., Schueler, S., 2012. Intraspecific variation in climate response of Norway spruce in the eastern Alpine range: Selecting appropriate provenances for future climate. Forest Ecology and Management 271, 46–57. doi:10.1016/j.foreco.2012.01.039

Kirchgessner, M., Roth, F.X., Windisch, W., 1993. Verminderung der Stickstoff-und Methanausscheidung von Schwein und Rind durch die Fütterung. Übersichten zur Tierernährung 21, 89–120.

Kirchner, M., Strauss, F., Heumesser, C., Schmid, E., 2012. Integrative model analysis of adaptation measures to a warmer and drier climate, in: Hambrusch, J., Hoffmann, C., Kantelhardt, J., Oedl-Wieser, T. (Eds.), Jahrbuch Der Österreichischen Gesellschaft Für Agrarökonomie. Facultas-Verlag, Wien, pp. 177–186.

Kirschbaum, M.U.F., 1995. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage. Soil Biology and Biochemistry 27, 753–760. doi:10.1016/0038-0717(94)00242-S

Kleidorfer, M., Möderl, M., Sitzenfrei, R., Urich, C., Rauch, W., 2009. A case independent approach on the impact of climate change effects on combined sewer system performance. Water science and technology 60, 1555–1564. doi:10.2166/wst.2009.520

Kleinbauer, I., Dullinger, S., Klingenstein, F., May, R., Nehring, S., Albrecht, F.M., 2010b. Ausbreitungspotenzial ausgewählter neophytischer Gefäßpflanzen unter Klimawandel in Deutschland und Österreich (BfN-Skripten No. 275). Bundesamt für Naturschutz (BfN), Bonn,Bad Godesberg.

Kleinbauer, I., Dullinger, S., Peterseil, J., Essl, F., 2010a. Climate change might drive the invasive tree Robinia pseudacacia into

nature reserves and endangered habitats. Biological Conservation 143, 382–390. doi:10.1016/j.biocon.2009.10.024

Klemedtsson, L., Ernfors, M., Björk, R.G., Weslien, P., Rütting, T., Crill, P., Sikström, U., 2010. Reduction of greenhouse gas emissions by wood ash application to a Picea abies (L.) Karst. forest on a drained organic soil. European Journal of Soil Science 61, 734–744. doi:10.1111/j.1365-2389.2010.01279.x

Klemedtsson, L., Von Arnold, K., Weslien, P., Gundersen, P., 2005. Soil CN ratio as a scalar parameter to predict nitrous oxide emissions. Global Change Biology 11, 1142–1147. doi:10.1111/j.1365-2486.2005.00973.x

Klik, A., 2003. Einfluss unterschiedlicher Bodenbearbeitung auf Oberflächenabfluss, Bodenabtrag sowie auf Nährstoff- und Pestizidausträge. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 55, 89–96.

Klik, A., Eitzinger, J., 2010. Impact of climate change on soil erosion and the efficiency of soil conservation practices in Austria. The Journal of Agricultural Science 148, 529–541. doi:10.1017/S0021859610000158

Klik, A., Hofmann, J., 2011. Using the concept of a soil quality index (SQI) TO evaluate agricultural soils with and without soil protection measures in Lower Austria, in: IAEA (Ed.), Impact of Soil Conservation Measures on Erosion Control and Soil Quality. International Atomic Energy Agency, Vienna, pp. 297–309.

Klik, A., Rosner, J., Loiskandl, W., 1998. Effects of temporary and permanent soil cover on grape yield and soil chemical and physical properties. Journal of Soil and Water Conservation 53, 249–253.

Klik, A., Trümper, G., Baatar, U., Strohmeier, S., Liebhard, P., Deim, F., Moitzi, G., Schüller, M., Rampazzo, N., Mentler, A., Rampazzo-Todorovic, G., Brauner, E., Blum, W., Köllensperger, G., Hann, S., Breuer, G., Stürmer, B., Frank, S., Blatt, J., Rosner, J., Zwatz-Walter, E., Bruckner, R., Gruber, J., Spieß, R., Sanitzer, H., Haile, T.M., Selim, S., Grillitsch, B., Altmann, D., Guseck, C., Bursch, W., Fürhacker, M., 2010. Einfluss unterschiedlicher Bodenbearbeitungssysteme auf Kohlenstoffdynamik, CO2-Emissionen und das Verhalten von Glyphosat und AMPA im Boden (Abschlussbericht No. Forschungsprojekt Nr.: 100069, GZ BM-LFUW-LE.1.3.2/0130-II/1/2006). im Auftrag des BMLFUW in Kooperation mit den Bundesländern Niederösterreich und Steiermark, Wien.

Klinglmüller, M., 2013. Effects of biochar on greenhouse gas fluxes from agricultural soils and resulting greenhouse gas abatement costs – an Austrian case study (Master Thesis). Universität für Bodenkultur Wien, Österreich, Wien.

Klinglmüller, M., Kitzler, B., Bücker, J., Wimmer, B., Watzinger, A., Zehetner, F., Soja, G., Zechmeister-Boltenstern, S., 2011. Effects of biochar on greenhouse gas fluxes of agricultural soils., in: Geophysical Research Abstracts. Presented at the EGU General Assembly 2011, Copernicus GmbH, Wien.

KLIWA, 2006. Unser Klima ändert sich, Folgen-Ausmaß-Strategien. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz. LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz, Baden-Württemberg.

Klöcking, B., Haferkorn, U., Bräunig, A., 2009. Auswirkungen des Klimawandels auf den Bodenwasserhaushalt in Sachsen - Modellierung und Lysimeterbeobachtungen, in: Lysimeter - Perspektiven in Forschung und Anwendung. Bericht der 13. Gumpensteiner Lysimetertagung, 21. und 22. April 2009. Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft, Raumberg-Gumpenstein, Irdning, pp. 127–130.

Koerber, K. von, Kretschmer, J., 2000. Zukunftsfähige Ernährung-Gesundheits-, Umwelt-, Wirtschafts- und Sozialverträglichkeit im Lebensmittelbereich. Zeitschrift für Ernährungsökologie (ERNO) 1, 39–46. doi:http://dx.doi.org/10.1065/erno2000.02.005

Koetse, M.J., Rietveld, P., 2009. The impact of climate change and weather on transport: An overview of empirical findings. Transportation Research Part D: Transport and Environment 14, 205–221. doi:10.1016/j.trd.2008.12.004

Koland, O., Meyer, I., Schmid, E., Gobiet, A., Kletzan-Slamanig, D., Kettner, C., Loibenegger, T., Schmid, C., Schönhart, M., Trink, T., 2010. Adequacy of Mitigation and Adaptation Options for a Case Study Region in Austria – The Case for Agriculture and Forestry. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien.

Koland, O., Schönhart, M., Schmid, E., 2013. International Trade of Bio-Energy Products - Economic Potentials for Austria (Study), Study commissioned by the Austrian Federal Ministry of Economic Affairs, Family and Youth (BMWFJ) as part of the project „Research Centre International Economics“ FIW. Wegener Center for Climate and Global Change, University of Graz and Institute for Sustainable Ceonomic Development, University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna, Vienna.

Köpke, U., Haas, G., 1995. Vergleich konventioneller und organischer Landbau – Teil II: Klimarelevante Kohlendioxid-Senken von Pflanzen und Boden, in: Berichte Über Landwirtschaft: Zeitschrift Für Agrarpolitik Und Landwirtschaft. Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup, pp. 416–434.

Körner, C., 2003. Slow in, Rapid out--Carbon Flux Studies and Kyoto Targets. Science 300, 1242–1243. doi:10.1126/science.1084460

Körner, C., 2009. Biologische Kohlenstoffsenken: Umsatz und Kapital nicht verwechselnBiological Carbon Sinks: Turnover Must Not Be Confused with Capital. GAIA-Ecological Perspectives for Science and Society 18, 288–293.

Kranert, M., Hafner, G., Barabosz, J., Schuller, H., Leverenz, D., Kölbig, A., Schneider, F., Lebersorger, S., Scherhaufer, S., 2012. Ermittlung der weggeworfenen Lebensmittelmengen und Vorschläge zur Verminderung der Wegwerfrate bei Lebensmitteln in Deutschland (Studie gefördert vom BMELV). Universität Stuttgart, Stuttgart, Germany.

Kranzl, L., Haas, R., Kalt, G., Müller, A., Nakicenovic, N., Redl, C., Formayer, H., Haas, P., Lexer, M.-J., Seidl, R., Schörghuber, S., Nachtnebel, H.-P., Stanzel, P., 2010. KlimAdapt. Ableitung von prioritären Maßnahmen zur Adaption des Energiesystems an den Klimawandel (ENERGIE DER ZUKUNFT Endbericht). Energy Economics Group, TU Wien; Inst. für Meteorologie, Inst. für Waldbau, IWHW, Univ. für Bodenkultur, Wien.

Krausmann, F., 2001. Land use and industrial modernization: an empirical analysis of human influence on the functioning of ecosystems in Austria 1830–1995. Land Use Policy 18, 17–26. doi:10.1016/S0264-8377(00)00042-9

Krausmann, F., Haberl, H., Schulz, N.B., Erb, K.-H., Darge, E., Gaube, V., 2003. Land-use change and socio-economic metabolism in Austria–Part I: driving forces of land-use change: 1950–1995. Land Use Policy 20, 1–20. doi:10.1016/S0264-8377(02)00048-0

Krautzer, B., Buchgraber, K., Egger, H., Frank, P., Frühwirth, P., Hietz, M., Humer, J., Leonhardt, C., Luftensteiner, H., Mechtler, K., Meusburger, C., Peratoner, G., Pötsch, E., Starz, W., 2010. Handbuch für ÖAG-Empfehlungen von ÖAG-kontrollierten Qualitätssaatgutmischungen für das Dauergrünland und den Feldfutterbau 2011-2013. ÖAG-Fachgruppe Saatgutproduktion und Züchtung von Futterpflanzen, Irdning.

Krehan, H., Steyrer, G., 2007. Borkenkäfer 2006: Situation und Monitoring. Forstschutz Aktuell 39, 8–17.

Krehan, H., Steyrer, G., Tomiczek, C., 2010. Borkenkäfer-Kalamität 2009: Ursachen für unterschiedliche regionale Befallsentwicklungen. Forstschutz Aktuell 49, 9–16.

Krehan, H., Tomiczek, C., Steyrer, G., 2006. Treffen der Forstschutzreferenten zum Thema Borkenkäfer – Aktueller Situationsbericht und Diskussionsergebnisse. Forstschutz Aktuell 37, 5–7.

Kreuzinger, N., Kroiß, H., 2011. Klimawandel, qualitative Aspekte der Wasserwirtschaft und Nutzungsaspekte. Österr Wasser- und Abfallw 63, 42–51. doi:10.1007/s00506-010-0270-6

Kreuzinger, N., Schaar, H., 2012. Trends in der weitergehenden Abwasserreinigung - Technologische ansätze zur Entfernung organischer Spurenstoffe. Wiener Mitteilungen 226, 149–172.

Kromp-Kolb, H., Formayer, H., Eitzinger, J., 2007. Potentielle Auswirkungen und Anpassungsmaßnahmen der Landwirtschaft an den Klimawandel im Nordosten Österreichs (Weinviertel-Marchfeld Region), in: Formayer, H. (Ed.), Auswirkungen Des Klimawandels in Niederösterreich. NÖ Klimastudie 2007. Wien, pp. 97–140.

Kromp-Kolb, H., Gerersdorfer, T., Aspöck, H., Baier, P., Schopf, A., Gepp, J., Graf, W., Moog, O., Kromp, B., Kyek, M., 2003. Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Tierwelt–derzeitiger Wissensstand, fokussiert auf den Alpenraum und Österreich (Endbericht im Auftrag des Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft No. Projekt GZ 54 3895/171-V/4/02). Institut für Meteorologie und Physik, Universität für Bodenkultur Wien, Wien.

KTBL, 2010. Report on the economic value and the calculated energy and material fluxes, revised version. Report for the European Biogas Initiative to improve the yield of agricultural biogas plants. (Deliverable 22 No. Deliverable 22), Project no 513949. Kuratorium für Technick und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt.

Kukal, S.S., Kaur, M., Bawa, S.S., Gupta, N., 2007. Water-drop stability of PVA-treated natural soil aggregates from different land uses. CATENA 70, 475–479. doi:10.1016/j.catena.2006.11.013

Kummu, M., de Moel, H., Porkka, M., Siebert, S., Varis, O., Ward, P.J., 2012. Lost food, wasted resources: Global food supply chain losses and their impacts on freshwater, cropland, and fertiliser use. Science of The Total Environment 438, 477–489. doi:10.1016/j.scitotenv.2012.08.092

Lackner, C. (Ed.), 2009. Holz- und Biomassepotenzialstudie. BFW-Praxisinformation 18.

Lauk, C., Haberl, H., Erb, K.-H., Gingrich, S., Krausmann, F., September 1, 2012a. Global socioeconomic carbon stocks in long-lived products 1900–2008. Environ. Res. Lett. 7. doi:10.1088/1748-9326/7/3/034023

Lauk, C., Schriefl, E., Kalt, G., Kranzl, L., Wind, G., 2012b. Bedarfs- und Produktionsszenarien von Nahrungsmitteln, Futtermitteln und stofflich sowie energetisch genutzter Biomasse in Österreich bis 2050. (Endbericht Projekt Nr 822028, KLIEN No. Teilbericht 6), Save our Surface - Politikoptionen und Konfliktmanagement. Umweltbüro Klagenfurt, Energieautark consulting, LFZ Raumberg Gumpenstein, Ludwig Bölkow Systemtechnik, Universität für Bodenkultur, TU Wien, Universität Graz, Universität Klagenfurt, Graz, Irdning, Klagenfurt, München, Wien.

Le Quéré, C., Raupach, M.R., Canadell, J.G., Al, G.M. et, Al, C.L.Q. et, Marland, G., Bopp, L., Ciais, P., Conway, T.J., Doney, S.C., Feely, R.A., Foster, P., Friedlingstein, P., Gurney, K., Houghton, R.A., House, J.I., Huntingford, C., Levy, P.E., Lomas, M.R., Majkut, J., Metzl, N., Ometto, J.P., Peters, G.P., Prentice, I.C., Randerson, J.T., Running, S.W., Sarmiento, J.L., Schuster, U., Sitch, S., Takahashi, T., Viovy, N., van der Werf, G.R., Woodward, F.I., 2009. Trends in the sources and sinks of carbon dioxide. Nature Geosciences 2, 831–836. doi:10.1038/ngeo689

Lebensministerium, 2012. Wasser in Österreich [WWW Document]. URL http://www.lebensministerium.at/wasser/wasser-oesterreich.html (accessed 11.27.13).

Lehner, B., Czisch, G., Vassolo, S., 2005. The impact of global change on the hydropower potential of Europe: a model-based analysis. Energy Policy 33, 839–855. doi:10.1016/j.enpol.2003.10.018

Leip, A., Weiss, F., Wassenaar, T., Perez, I., Fellmann, T., Loudjani, P., Tubiello, F., Grandgirard, D., Monni, S., Biala, K., 2010. Evaluation of the livestock sector's contribution to the EU greenhouse gas emissions (GGELS) – final report. European Commission, Joint Research Centre.

Lenis, N.P., Schutte, J.B., 1990. Aminozuurvoorziening van biggen en vleesvarkens in relatie tot de stikstofuitscheiding., in: Jongbloed, A.W., Coppoolse, J. (Eds.), Mestproblematiek: Aanpak via de Voeding van Varkens En Pluimvee. Onderzoek Inzake de Mest En Ammoniakproblematiek in de Veehouderij. Dienst Landbouwkundig Onderzoek, Wageningen, pp. 79–89.

Leonhartsberger, C., Bauer, A., Lyson, D., Kryvoruchko, V., Bodiroza, V., Milovanovic, D., Friedel, J.K., Rinnhofer, T., Amon, T., 2008. Sustainable biogas production through the integration of high-yielding and site-adapted energy crops into crop rotation systems., in: Novosad, J. (Ed.), 18th International Congress of Chemical and Process Engineering 24 - 28 August 2008, CHISA 2008, Process Engineering Publisher. Process Engineering Publisher.

Lexer, M.J., 2012. Waldwirtschaft im Klimawandel - ein Hintergrundbericht der CIPRA (Compact No. 01/2012). CIPRA International, Schaan.

Lexer, M.J., Hönninger, K., Scheifinger, H., Matulla, C., Groll, N., Kromp-Kolb, H., Schadauer, K., Starlinger, F., Englisch, M., 2001. The sensitivity of Austrian forests to scenarios of climatic change: a large-scale risk assessment based on a modified gap model and forest inventory data, Monographien. Umweltbundesamt, Wien.

Lexer, M.J., Vacik, H., Palmetzhofer, D., Oitzinger, G., 2005. A decision support tool to improve forestry extension services for small private landowners in southern Austria. Computers and Electronics in Agriculture 49, 81–102. doi:10.1016/j.compag.2005.02.004

Lindenthal, T., Markut, T., Hörtenhuber, S., Theurl, M., Rudolph, G., 2010. Greenhouse gas emissions of organic and conventional foodstuffs in Austria, in: VII. International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-Food Sector (LCA Food), Proceeding Vol. 1. Presented at the VII. International conference on life cycle assessment in the agri-food sector (LCA Food), Bari, Italy, pp. 319–324.

Lindenthal, T., Rudolph, G., Theurl, M., Hörtenhuber, S., Kraus, G., 2011. Biologische Bodenbewirtschaftung als Schlüssel zum Klimaschutz in der Landwirtschaft. Studie im Auftrag von Bio Austria. Forschungsinstitut für Biologischen Landbau, FiBL, Wien. (Studie im Auftrag v on Bio Austria). FIBL Österreich.

Lindner, M., Maroschek, M., Netherer, S., Kremer, A., Barbati, A., Garcia-Gonzalo, J., Seidl, R., Delzon, S., Corona, P., Kolström, M., 2010. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. Forest Ecology and Management 259, 698–709.

Liski, J., Tuomi, M., Rasinmäki, J., 2009. Yasso07 user-interface manual. Finnish Environment Institute, Helsinki.

Liu, L., Greaver, T.L., 2009. A review of nitrogen enrichment effects on three biogenic GHGs: the CO2 sink may be largely offset by stimulated N2O and CH4 emission. Ecology Letters 12, 1103–1117. doi:10.1111/j.1461-0248.2009.01351.x

Lo, A.Y., Spash, C.L., 2013. Deliberative Monetary Valuation: In Search of a Democratic and Value Plural Approach to Environmental Policy. Journal of Economic Surveys 27, 768–789. doi:10.1111/j.1467-6419.2011.00718.x

Lotter, D.W., Seidel, R., Liebhardt, W., 2003. The performance of organic and conventional cropping systems in an extreme climate year. American Journal of Alternative Agriculture 18, 146–154. doi:http://dx.doi.org/10.1079/AJAA200345

Lovejoy, T.E., 2006. Protected areas: a prism for a changing world. Trends in Ecology & Evolution 21, 329–333. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.tree.2006.04.005

Lovejoy, T.E., Hannah, L.J., 2005. Climate Change and Biodiversity. Yale University Press.

Luyssaert, S., Ciais, P., Piao, S.L., Schulze, E.-D., Jung, M., Zaehle, S., Schelhaas, M.J., Reichstein, M., Churkina, G., Papale, D., Abril, G., Beer, C., Grace, J., Loustau, D., Matteucci, G., Magnani, F., Nabuurs, G.J., Verbeeck, H., Sulkava, M., Van der Werf, G.R., Janssens, I.A., Members of the Carboeurope-IP Synthesis Team, 2010. The European carbon balance. Part 3: forests. Global Change Biology 16, 1429–1450. doi:10.1111/j.1365-2486.2009.02056.x

Luyssaert, S., Schulze, E.-D., Börner, A., Knohl, A., Hessenmöller, D., Law, B.E., Ciais, P., Grace, J., 2008. Old-growth forests as global carbon sinks. Nature 455, 213–215. doi:10.1038/nature07276

Machefert, S.E., Dise, N.B., Goulding, K.W.T., Whitehead, P.G., 1999. Nitrous oxide emission from a range of land uses across Europe. Hydrol. Earth Syst. Sci. 6, 325–338. doi:10.5194/hess-6-325-2002

Mäder, P., Fliessbach, A., Dubois, D., Gunst, L., Fried, P., Niggli, U., 2002. Soil fertility and biodiversity in organic farming. Science 296, 1694–1697. doi:10.1126/science.1071148

Maierhofer, A., 2009. Wahrnehmung von Klimaänderungsfolgen und Anpassungsbedarf aus der Sicht von Verwaltung und Forstbetrieben in Österreich (Masterarbeit). Institut für Waldbau, Department für Wald- und Bodenwissenschaften der Universität für Bodenkultur, Wien.

Maljanen, M., Sigurdsson, B.D., Guðmundsson, J., Óskarsson, H., Huttunen, J.T., Martikainen, P.J., 2010. Greenhouse gas balances of managed peatlands in the Nordic countries – present knowledge and gaps. Biogeosciences 7, 2711–2738. doi:10.5194/bg-7-2711-2010

Malmsheimer, R.W., Bowyer, J.L., Fried, J.S., Gee, E., Izlar, R.L., Miner, R.A., Munn, I.A., Oneil, E., Stewart, W.C., 2011. Managing forests because carbon matters: integrating energy, products, and land management policy. Journal of Forestry 109, 7–51.

Mannering, J.V., Schertz, D.L., Julian, B.A., 1987. Overview of conservation tillage, in: Logan, T.J., Davidson, J.M., Backer, J.L., Overcash, M.R. (Eds.), Effects of Conservation Tillage on Groundwater Quality-Nitrates and Pesticides. Lewis Publ., Chelsea, Chelsea, MI, pp. 3–13.

Mannsberger, G., 2009. HOBI-Studie: Zusammenschau und Schlussfolgerungen. BFW Praxisinformation, Holz- und Biomassenstudie 18, 20–21.

Maroschek, M.G., Lexer, M., 2010. Österreichs Wald im Treibhaus: Nicht heimische Bäume als Lösung?, in: Rabitsch, W., Essl, F. (Eds.), Aliens: Neobiota und Klimawandel - eine verhängnisvolle Affäre?, Erschienen anlässlich der Ausstellung: „ALIENS - Pflanzen und Tiere auf Wanderschaft" im Landesmuseum Niederösterreich. Bibliothek der Provinz, Weitra, pp. 105–113.

McAlpine, C.A., Etter, A., Fearnside, P.M., Seabrook, L., Laurance, W.F., 2009. Increasing world consumption of beef as a driver of regional and global change: A call for policy action based on evidence from Queensland (Australia), Colombia and Brazil. Global Environmental Change 19, 21–33.

McDonald, G.K., Peck, D., 2009. Effects of crop rotation, residue retention and sowing time on the incidence and survival of ascochyta blight and its effect on grain yield of field peas (< i> Pisum sativum L.). Field Crops Research 111, 11–21.

McInnes, G., 1996. Joint EMEP/CORINAIR Atmospheric Emission Inventory Guidebook. European Environmental Agency (EEA), Copenhagen.

MEA, 2003. Ecosystems and human well-being: a framework for assessment. Island Press, Washington, Covelo, London.

MEA, MA, 2005. Ecosystems and Human Well-being: General Synthesis. Island Press, Washington, DC.

Melcher, R., Pletterbauer, F., Schmutz, S., 2010. Fischfauna und Klimaänderung, in: ÖWAV, R. (Ed.), Auswirkungen Des Klimawandels Auf Die Österreichische Wasserwirtschaft. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV), Wien, pp. 135–144.

Menzel, A., Sparks, T.H., Estrella, N., Koch, E., Aasa, A., Ahas, R., Alm-KüBler, K., Bissolli, P., Braslavská, O., Briede, A., Chmielewski, F.M., Crepinsek, Z., Curnel, Y., Dahl, A., Defila, C., Donnelly, A., Filella, Y., Jatczak, K., Måge, F., Mestre, A., Nordli, øYvind, Peñuelas, J., Pirinen, P., Remišová, V., Scheifinger, H., Striz, M., Susnik, A., Van Vliet, A.J.H., Wielgolaski, F.-E., Zach, S., Zust, A., 2006. European phenological response to climate change matches the warming pattern. Global Change Biology 12, 1969–1976. doi:10.1111/j.1365-2486.2006.01193.x

Messer, T., 1980. Soil erosion measurements on experimental plots in Alsace vineyards (France). Assessment of Erosion 455–462.

Meyer, L.D., Dabney, S.M., Murphree, C.E., Harmon, W.C., Grissinger, E.H., 1999. Crop production systems to control erosion and reduce runoff from upland silty soils. Transactions of the ASAE 42, 1645–1652.

Mitter, H., Kirchner, M., Schmid, E., Schönhart, M., 2014. The participation of agricultural stakeholders in assessing regional vulnerability of cropland to soil water erosion in Austria. Reg Environ Change 14, 385–400. doi:10.1007/s10113-013-0506-7

MOBI, W., 2006. MOBI-e, Konzept für ein Biodiversitäts-Monitoring in Österreich. im Auftrag des Bundesministerium für Land und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.

Moitzi, G., Weingartmann, H., Boxberger, J., 2006. Effects of tillage systems and wheel slip on fuel consumption. The Union of Scientists-Rousse: Energy Efficiency and Agricultural Engineering 7.

Mondelaers, K., Aertsens, J., Van Huylenbroeck, G., 2009. A meta-analysis of the differences in environmental impacts between organic and conventional farming. British Food Journal 111, 1098–1119.

Monteny, G.-J., 2000. Modelling of ammonia emissions from dairy cow houses (Proefschrift). Wageningen Universiteit, Wageningen.

Montgomery, D.R., 2007. Soil erosion and agricultural sustainability. PNAS 104, 13268–13272. doi:10.1073/pnas.0611508104

Moore, B.A., Allard, G.B., 2008. Climate change impacts on forest health (Forest Health & Biosecurity Working Papers FBS/34E),

Forest Resources Development Service. Forest Management Division, FAO, Rome.

Nachtnebel, H.P., 2008. Auswirkungen von möglichen Klimaänderungen auf die Hydrologie und Wasserwirtschaft in einigen österreichischen Regionen, in: ÖWAV (Ed.), Auswirkungen Des Klimawandels Auf Die Österreichische Wasserwirtschaft. BMLFUW und ÖWAV, Wien, pp. 27–52.

Nemesthothy, K., Österreichischer Biomasseverband, 2013. Die Rolle der energetischen Biomassenutzung in der Wertschöpfungskette Holz. Erneuerbare Energie, Schlüssel zur Energiewende. Österreichischer Biomasseverband, Wien 50–57.

Nentwig, W., 1992. Die nützlingsfördernde Wirkung von Unkräutern in angesäten Unkrautstreifen. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz Sonderheft 13, 33–40.

Netherer, S., Schopf, A., 2010. Potential effects of climate change on insect herbivores in European forests—General aspects and the pine processionary moth as specific example. Forest Ecology and Management 259, 831–838. doi:10.1016/j.foreco.2009.07.034

Neunteufel, R., Richart, L., Perfler, R., 2012. Wasserverbrauch und Wasserbedarf – Auswertung empirischer Daten zum Wasserverbrauch. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV), Wien.

Niggli, U., Earley, J., Ogorzalek, K., 2007. Organic agriculture and food supply stability. Ecological and environmental stability of the food supply, in: Proceedings of the International Conference on Organic Agriculture and Food Security. Presented at the International Conference on Organic Agriculture and Food Security, FAO, Rome.

Normand, S., Svenning, J.-C., Skov, F., 2007. National and European perspectives on climate change sensitivity of the habitats directive characteristic plant species. Journal for Nature Conservation 15, 41–53. doi:10.1016/j.jnc.2006.09.001

Oberforster, M., Flamm, C., n.d. Reaktion eines Wiezensortiments auf induzierten Trockenstress. Vortäge zur Pflanzenzüchtung 72, 199–202.

OcCC / ProClim, 2007. Klimaänderung in der Schweiz 2050. Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft. OcCC Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung, Bern.

OECD, 2012. OECD Environmental Outlook to 2050. Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), Paris.

Ökonomische Bewertung von Umweltschäden–Methodenkonvention zur Schätzung externer Umweltkosten, 2007. . Umweltbundesamt, Dessau.

Olesen, J.E., Bindi, M., 2002. Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. European Journal of Agronomy 16, 239–262. doi:10.1016/S1161-0301(02)00004-7

Olesen, J.E., Schelde, K., Weiske, A., Weisbjerg, M.R., Asman, W.A., Djurhuus, J., 2006. Modelling greenhouse gas emissions from European conventional and organic dairy farms. Agriculture, Ecosystems & Environment 112, 207–220. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2005.08.022

ÖSTRAT, 2010. Österreichische Strategie Nachhaltige Entwicklung (ÖSTRAT), ein Handlungsrahmen für Bund und Länder (No. Zl. BMLFUW–LE.1.4.5/0012-II/3/2010). Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV), Wien.

Pachatz, G.C., 2005. Analyse der Effizienz der Hagelabwehr in der Steiermark anhand von Fallbeispielen. (Wissenschaftlicher Bericht No. 3-2005). Wegener Zentrum für Klima und Globalen Wandel Karl-Franzens-Universität Graz, Graz.

Padulosi, S., Heywood, V., Hunter, D., Jarvis, A., 2011. Underutilized Species and Climate Change, in: Yadav, S.S., Redden, R., Hatfield, J.L., Lotze-Campen, H., Hall, A.J.W. (Eds.), Crop Adaptation to Climate Change. Wiley-Blackwell, Chichester, pp. 507–517.

Paleg, L.G., Aspinall, D. (Eds.), 1981. The physiology and biochemistry of drought resistance in plants. Academic Press.

Parfitt, J., Barthel, M., Macnaughton, S., 2010. Food waste within food supply chains: quantification and potential for change to 2050. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences 365, 3065–3081. doi:10.1098/rstb.2010.0126

Pauli, H., Gottfried, M., Dullinger, S., Abdaladze, O., Akhalkatsi, M., Alonso, J.L.B., Coldea, G., Dick, J., Erschbamer, B., Calzado, R.F., Ghosn, D., Holten, J.I., Kanka, R., Kazakis, G., Kollár, J., Larsson, P., Moiseev, P., Moiseev, D., Molau, U., Mesa, J.M., Nagy, L., Pelino, G., Puşcaş, M., Rossi, G., Stanisci, A., Syverhuset, A.O., Theurillat, J.-P., Tomaselli, M., Unterluggauer, P., Villar, L., Vittoz, P., Grabherr, G., 2012. Recent Plant Diversity Changes on Europe's Mountain Summits. Science 336, 353–355. doi:10.1126/science.1219033

Pimentel, D., Hepperly, P., Hanson, J., Douds, D., Seidel, R., 2005. Environmental, energetic, and economic comparisons of organic and conventional farming systems. BioScience 55, 573–582. doi:http://dx.doi.org/10.1641/0006-3568(2005)055[0573:EEAECO]2.0.CO;2

Piot, M., 2006. Auswirkungen der Klimaerwärmung auf die Wasserkraftproduktion in der Schweiz. Wasser Energie Luft 97, 365–367.

Pirker, O., 2007. Climate change and Hydropower, Consequences and challenges, in: Umweltbundesamt Und Bundesministerium Für Umwelt, Naturschutz Und Reaktorsicherheit. Presented at the Symposium on climate change and the European Water Dimension, 12.-14.02.2007, Berlin.

Plevin, R.J., O'Hare, M., Jones, A.D., Torn, M., Gibbs, H.K., 2010. Greenhouse Gas Emissions from Biofuels' Indirect Land Use Change Are Uncertain but May Be Much Greater than Previously Estimated. Environmental Science & Technology 44, 8015–8021. doi:10.1021/es101946t

Pommerening, A., Murphy, S.T., 2004. A review of the history, definitions and methods of continuous cover forestry with special attention to afforestation and restocking. Forestry 77, 27–44. doi:10.1093/forestry/77.1.27

Pompe, S., Hanspach, J., Badeck, F.-W., Klotz, S., Bruelheide, H., Kühn, I., 2010. Investigating habitat-specific plant species pools under climate change. Basic and Applied Ecology 11, 603–611. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.baae.2010.08.007

Pötsch, E., 2010. Multifunktionalität und Bewirtschaftungsvielfalt im Grünland, in: Bericht über das 16. Alpenländische Expertenforum zum Thema Biodiversität im Grünland: am 11. März 2010 am LFZ Raumberg-Gumpenstein. Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, Irdning, pp. 1–10.

Pötsch, E. (Ed.), 2012. Optimale Grünlandbewirtschaftung in Bergregionen, in: Milchproduktion - Status quo und Anpassung an zukünftige Herausforderungen: 39. Viehwirtschaftliche Fachtagung gemäß Fortbildungsplan des Bundes; 25. und 26. April 2012. Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, Irdning, pp. 9–18.

Pöyry Energie GmbH, 2008. Wasserkraftpotenzialstudie Österreich. Pöyry Energie GmbH im Auftrag des Verbandes der Elektrizitätsunternehmen Österreichs (VEÖ), Wien.
Prehm, J., Beer, R., 2012. Datensammlung 2012 zum österreichischen Waldbericht. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
Prettenthaler, F., Strametz, S., Töglhofer, C., Türk, A., 2006. Anpassung gegen Trockenheit: Bewertung ökonomisch-finanzieller versus technischer Ansätze des Riskiomanagements. Wegener Center Verlag, Graz, Austria.
Pruski, F.F., Nearing, M.A., 2002a. Runoff and soil loss changes expected for changes in precipitation patterns under global climate change. J. Soil Water Conserv 57, 7–16.
Pruski, F.F., Nearing, M.A., 2002b. Climate-induced changes in erosion during the 21st century for eight US locations. Water Resources Research 38, 34–1. doi:10.1029/2001WR000493
Rahmann, G., Aulrich, K., Barth, K., Boehm, H., Koopmann, R., Oppermann, R., Paulsen, H.M., Weissmann, F., 2008. Impact of organic farming on global warming-recent scientific knowledge. Landbauforschung Volkenrode 58, 71–89.
Ramskogler, K., Hartleitner, C., 2012. Herkunftssicherheit und Saatgutversorgung. BFW Praxisinformation 29, . BFW Praxisinformation 29, 13–14.
Redl, H., 2008b. Weinbauliche Maßnahmen bei Klimaveränderung zur Basissicherung der regionale Wein-Typizität, in: Weinbauverein Großriedentahl-Neudegg, LAKO Und LFI, Nachlese Zum 19. Intern. Weinbautag Großriedenthal, Tagungsmappe. Presented at the 19. Intern. Großriedenthaler Weinbautag, Großriedenthal, 04.02.2008.
Redl, H., 2008a. Ergebnisse aus trockenen Weinbaulagen Österreichs, Teil 3 : Tropfbewässerung zur Qualitätsoptimierung. Der Winzer 64, 22–27.
Redl, H., 2006. Qualitätsorientierte Maßnahmen im Weinbau bei Witterungsextremen, in: Weinbauverein Großriedentahl-Neudegg, LAKO Und LFI, Nachlese Zum 17. Intern. Weinbautag Großriedenthal, Tagungsmappe. Presented at the 17. Intern. Großriedenthaler Weinbautag, Großriedenthal, 27.02.2006.
Redl, H., 2007. Erhöhung der Weinqualität im Weinbau und Sicherung der Nachhaltigkeit, Teil1 : Bewässerung im österreichischen Weinbau. Der Winzer 63, 25–27.
Redl, H., 2011. Ziel Nachhaltiger Weinbau - haben wir das Ziel schon erreich?, in: Bayer CropScience Weinbausymposium 2011. Presented at the Bayer CropScience Weinbausymposium 2011, 17.11.2011, Andau.
Redl, H., 2012. Nutzen für Forschung und Praxis: Klimadatenbank und aktuelles Wetter für Weinbau. Der Winzer 68, 6–11.
Reganold, J.P., Elliott, L.F., Unger, Y.L., 1987. Long-term effects of organic and conventional farming on soil erosion. Nature 330, 370–372.
Reidsma, P., Ewert, F., 2008. Regional farm diversity can reduce vulnerability of food production to climate change. Ecology and Society 13.
Reif, A., Aas, G., Essl, F., 2011. Braucht der Wald in Zeiten der Klimaveränderung neue, nicht heimische Baumarten? - Do forests need new, non-native species in times of climate change? Natur und Landschaft 86.
Rodriguez, D., deVoil, P., Power, B., Cox, H., Crimp, S., Meinke, H., 2011. The intrinsic plasticity of farm businesses and their resilience to change. An Australian example. Field Crops Research 124, 157–170. doi:10.1016/j.fcr.2011.02.012
Rüdisser, J., Schönhart, M., Schmidt, E., Sinabell, F., Tappeiner, U., Tasser, E., 2011. Land use and biodiversity: an indicator set supporting sustainable development, in: Borsdorf, A., Stötter, J., Veuillet, E. (Eds.), Managing Alpine Future II: proceedings of the Innsbruck Conference November 21-23, 2011. Verl. der Oesterr. Akad. der Wiss, Wien, pp. 183–192.
Russ, W., 2011. Mehr Wald in Österreich. BFW Praxisinformation 3–5.
Schadauer, K., 2012. Altersklassendenken – ein zeitgemäßes Nachhaltigkeitswerkzeug? BFW Praxisinformation, Nachhaltigkeit 27, 7–8.
Schadauer, K., Büchsenmeister, R., 2004. Holzvorrat wieder deutlich gestiegen: Milliardengrenze ist durchbrochen. BFW Praxisinformation, Österreichische Waldinventur 2000/02 - Hauptergebnisse 3, 8–10.
Schadauer, K., Neumann, M., 2008. Holz- und Biomasseaufkommensstudie für Österreich (Endbericht zum Forschungsprojekt Nr. 100203). Bundesamt für Wald, Universität für Bodenkultur, Umweltbundesamt, BirdLife, Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit, Wien.
Schädler, B., Frei, C., Grebner, D., Willi, H.-P., 2007. Grundlagen zum Klima. Wasser Energie Luft 99, 58–60.
Schaumberger, A., 2012. Räumliche Modelle zur Vegetations- und Ertragsdynamik im Wirtschaftsgrünland (Dissertation). TU Graz, Institut für Geoinformation, Graz.
Schlatzer, M., 2011. Tierproduktion und Klimawandel: ein wissenschaftlicher Diskurs zum Einfluss der Ernährung auf Umwelt und Klima, 2. Auflage. ed. LIT Verlag Münster, Wien, Österreich.
Schleiss, A., De Cesare, G., Althaus, D., 2010. Verlandung der Stauseen gefährdet die nachhaltige Nutzung der Wasserkraft. Wasser Energie Luft 102, 31–40.
Schmidt, J., Leduc, S., Dotzauer, E., Kindermann, G., Schmid, E., 2009. Potential of biomass-fired combined heat and power plants considering the spatial distribution of biomass supply and heat demand. International Journal of Energy Research 34, 970–985. doi:10.1002/er.1623
Schmidt, J., Leduc, S., Dotzauer, E., Kindermann, G., Schmid, E., 2010. Cost-effective CO2 emission reduction through heat, power and biofuel production from woody biomass: A spatially explicit comparison of conversion technologies. Applied Energy 87, 2128–2141. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.11.007
Schmidt, J., Leduc, S., Dotzauer, E., Schmid, E., 2011. Analyzin the cost effectiveness of energy policy instruments in the bioenergy sector. Energy Policy 39, 3261–3280. doi:10.1016/j.enpol.2011.03.018
Schmidt, J., Schönhart, M., Biberacher, M., Guggenberger, T., Hausl, S., Kalt, G., Leduc, S., Schardinger, I., Schmid, E., 2012. Regional energy autarky: Potentials, costs and consequences for an Austrian region. Energy Policy 47, 211–221. doi:10.1016/j.enpol.2012.04.059
Schmutz, R.S., Schinegger, R., Muhar, S., Preis, S., Jungwirth, M., 2010. Ökologischer Zustand der Fließgewässer Österreichs – Perspektiven bei unterschiedlichen Nutzungsszenarien der Wasserkraft. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 56(62), 162–167. doi:10.1007/s00506-010-0221-2
Schmutz, S., 2003. Einfluss erhöhter Schwebstoffkonzentration und Trübe auf Fische (Dissertation). Universität für Bodenkultur, Instutut für Hydrobiologie und Gewässermanagement, Wien.
Scholz, M., Ruge-Wehling, B., Habekuß, A., Schrader, O., Pendinen, G., Fischer, K., Wehling, P., 2009. Ryd4 Hb : a novel resistance gene introgressed from Hordeum bulbosum into barley and conferring complete and dominant resistance to the barley yel-

low dwarf virus. Theor Appl Genet 119, 837–849. doi:10.1007/s00122-009-1093-3

Schön, C.C., Schmolke, M., Kunert, A., 2008. Stresstoleranz von Nutzpflanzen, in: Mendel-Kolloquium Klimawandel - Herausforderung Für Die Pflanzenzüchtung. Presented at the Mendel-Kolloquium Klimawandel - Herausforderung für die Pflanzenzüchtung, Gregor Mendel Stiftung, Bonn, pp. 39–44.

Schönhart, M., Koland, O., Schmid, E., Bednar-Friedl, B., Mitter, H., 2013. Linking bottom-up and top-down models to analyze climate change impacts on Austrian agriculture. Jahrbuch der Österreichischen Gesellschaft für Agrarökonomie 22.

Schönhart, M., Mitter, H., Schmid, E., Heinrich, G., Gobiet, A., 2014. Climate change impacts and adaptation in Austrian agriculture – an integrated bio-physical and economic analysis at high spatial resolution. German Journal of Agricultural Economics submitted.

Schulze, E.-D., Körner, C., Law, B.E., Haberl, H., Luyssaert, S., 2012. Large-scale bioenergy from additional harvest of forest biomass is neither sustainable nor greenhouse gas neutral. GCB Bioenergy 4, 611–616. doi:10.1111/j.1757-1707.2012.01169.x

Scientific American, 2012. Drought-Tolerant Corn Efforts Show Positive Early Results [WWW Document]. URL http://www.scientificamerican.com/article/drought-tolerant-corn-trials-show-positive-early-results/ (accessed 3.10.14).

Searchinger, T., Heimlich, R., Houghton, R.A., Dong, F., Elobeid, A., Fabiosa, J., Tokgoz, S., Hayes, D., Yu, T.-H., 2008. Use of U.S. Croplands for Biofuels Increases Greenhouse Gases Through Emissions from Land-Use Change. Science 319, 1238–1240. doi:10.1126/science.1151861

Searchinger, T.D., 2010. Biofuels and the need for additional carbon. Environ. Res. Lett. 5. doi:10.1088/1748-9326/5/2/024007

Searchinger, T.D., Hamburg, S.P., Melillo, J., Chameides, W., Havlik, P., Kammen, D.M., Likens, G.E., Lubowski, R.N., Obersteiner, M., Oppenheimer, M., Philip Robertson, G., Schlesinger, W.H., David Tilman, G., 2009. Fixing a Critical Climate Accounting Error. Science 326, 527–528. doi:10.1126/science.1178797

Seidl, R., Rammer, W., Lexer, M.J., 2011a. Adaptation options to reduce climate change vulnerability of sustainable forest management in the Austrian Alps. Can. J. For. Res. 41, 694–706. doi:10.1139/x10-235

Seidl, R., Schelhaas, M.-J., Lexer, M.J., 2011b. Unraveling the drivers of intensifying forest disturbance regimes in Europe. Global Change Biology 17, 2842–2852. doi:10.1111/j.1365-2486.2011.02452.x

Seidl, R., Schelhaas, M.-J., Lindner, M., Lexer, M.J., 2009. Modelling bark beetle disturbances in a large scale forest scenario model to assess climate change impacts and evaluate adaptive management strategies. Reg Environ Change 9, 101–119. doi:10.1007/s10113-008-0068-2

Shugart, H.H., 1984. A theory of forest dynamics: the ecological implications of forest succession models. Springer-Verlag, New York.

Smidt, S., Jandl, R., Dirnböck, T., Mutsch, F., Fürst, A., Zechmeister, H., Bauer, H., 2012. Versauerung und Stickstoffeutrophierung österreichischer Waldböden. Centralblatt für das gesamte Forstwesen 129, 124–147.

Smith, P., 2005. An overview of the permanence of soil organic carbon stocks: influence of direct human-induced, indirect and natural effects. European Journal of Soil Science 56, 673–680. doi:10.1111/j.1365-2389.2005.00708.x

Smith, P., Haberl, H., Popp, A., Erb, K., Lauk, C., Harper, R., Tubiello, F.N., de Siqueira Pinto, A., Jafari, M., Sohi, S., Masera, O., Böttcher, H., Berndes, G., Bustamante, M., Ahammad, H., Clark, H., Dong, H., Elsiddig, E.A., Mbow, C., Ravindranath, N.H., Rice, C.W., Robledo Abad, C., Romanovskaya, A., Sperling, F., Herrero, M., House, J.I., Rose, S., 2013. How much land-based greenhouse gas mitigation can be achieved without compromising food security and environmental goals? Global Change Biology 19, 2285–2302. doi:10.1111/gcb.12160

Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., McCarl, B., Ogle, S., O'Mara, F., Rice, C., Scholes, B., Sirotenko, O., 2007. Agriculture, in: Metz, B., Davidson, O.R., Bosch, B.R., Dave, R., Meyer, L.A. (Eds.), Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 497–540.

Soares-Filho, B.S., Nepstad, D.C., Curran, L.M., Cerqueira, G.C., Garcia, R.A., Ramos, C.A., Voll, E., McDonald, A., Lefebvre, P., Schlesinger, P., 2006. Modelling conservation in the Amazon basin. Nature 440, 520–523. doi:10.1038/nature04389

Soja, G., Kloss, S., Bücker, J., Rempt, F., Kitzler, B., Lauer, M., Zechmeister-Boltenstern, S., Zehetner, F., Watzinger, A., Wimmer, B., 2011. Yield performance of mustard and barley in biochar-amended soils at different nitrogen levels, in: Abstract Band. European Biochar Symposium 2011, September 26th to 27th in Halle (saale). Presented at the European Biochar Symposium 2011, Martin-Luther University Halle /Wittenberg, Halle (Saale).

Soja, G., Wimmer, B., Watzinger, A., Kloss, S., Zechmeister-Boltenstein, S., Kitzler, B., Gunczy, S., Zehetner, F., 2013. Biokohle als Bodenhilfsstoff - Nutzen, Risiken und Regulierungsbedarf, in: ALVA. Bericht ALVA - Jahrestagung 2013. Presented at the ALVA Jahrestagung 2013 „Pflanzenschutz als Beitrag zur Ernährungssicherung," Arbeitsgemeinschaft für Lebensmittel- Veterinär- und Agrarwesen (ALVA), Wien, pp. 66–68.

Soussana, J.F., Tallec, T., Blanfort, V., 2009. Mitigating the greenhouse gas balance of ruminant production systems through carbon sequestration in grasslands. Animal Feed Science and Technology 4, 334–350. doi:10.1017/S1751731109990784

Spash, C.L., 2011. Terrible Economics, Ecosystems and Banking. Environmental Values 20, 141–145.

St. Louis, V., Kelly, C.A., Duchemin, É., Rudd, J.W.M., Rosenberg, D.M., 2000. Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: A global estimate. BioScience 50, 766–775.

Statistik Austria, 2010. Schlachtungen und Fleischproduktion 2009 [WWW Document]. URL www.statistik.at/web_de/statistiken/land_und_forstwirtschaft/index.html (accessed 3.10.14).

Statistik Austria, 2012. Landwirtschaftliche Produktionsgebiete [WWW Document]. URL http://www.statistik.at/web_de/klassifikationen/regionale_gliederungen/landwirtschaftliche_haupt_und_kleinproduktionsgebiete/index.html (accessed 5.11.12).

Statistik Austria, 2014. Versorgungsbilanzen [WWW Document]. URL http://www.statistik.at/web_de/static/versorgungsbilanz_fuer_fleisch_nach_arten_2007_bis_2012_022374.pdf (accessed 3.10.14).

Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Alexandrov, V., Rosales, M., de Haan, C., 2006. Livestock's long shadow. Environmental issues and options.423. Steinfeld, H., P. Gerber, T. Wassenaar, V. Castel, M. Rosales, C. de Haan. Food and Agriculture Organization (FAO), Rome.

Sterner, M., Fritsche, U., 2011. Greenhouse gas balances and mitigation costs of 70 modern Germany-focused and 4 traditional

biomass pathways including land-use change effects. Biomass and Bioenergy 35, 4797–4814. doi:10.1016/j.biombioe.2011.08.024
Strauß, F., Fuss, S., Szolgayová, J., Schmid, E., 2010. Integrated assessment of crop management portfolios in adapting to climate change in the Marchfeld region, in: Pöchtrager, S., Eder, M. (Eds.), Jahrbuch Der Österreichischen Gesellschaft Für Agrarökonomie. Beiträge Der 19. ÖGA-Jahrestagung: „Rollen Der Landwirtschaft in Benachteiligten Regionen" 24. Und 25. September 2009, Universität Innsbruck. Facultas-Verlag, Wien, pp. 11–20.
Strauß, F., Heumesser, C., Fuss, S., Szolgayová, J., Schmid, E., 2011. Optimal Irrigation Management Strategies under Weather Uncertainty and Risk., in: Hambrusch, J., Larcher, C., Oedl-Wieser, T. (Eds.), Jahrbuch Der Österreichischen Gesellschaft Für Agrarökonomie. Beiträge Der 20. ÖGA-Jahrestagung: „Land- Und Ernährungswirtschaft 2020" 23. Und 24. September 2010, Universität Für Bodenkultur Wien. Facultas-Verlag, Wien, pp. 45–53.
Strauss, P., Klaghofer, E., 2006. Austria, in: Boardman, J., Poesen, J. (Eds.), Soil Erosion in Europe. John Wiley & Sons, Ltd, pp. 205–212.
Strauss, P., Swoboda, D., Blum, W.E.H., 2003. How effective is mulching and minimum tillage to control runoff and soil loss?—a literature review, in: Proceedings of the International Conference „25 Years of Assessment of Erosion" Ghent 22-26 September 2003. Presented at the International Conference „25 Years of Assessment of Erosion," Ghent, pp. 545–550.
Stürmer, B., Eder, M., 2010. Modell zur Optimierung der Substratbereitstellungskosten bei Biogasanlagen. Die Bodenkultur 61, 39–49.
Stürmer, B., Schmid, E., 2011b. Abschätzung des österreichischen Biogasproduktionspotentials zur Stromerzeugung in 2020, in: Hambrusch, J., Larcher, C., Oedl-Wieser, T. (Eds.), Jahrbuch Der Österreichischen Gesellschaft Für Agrarökonomie. Beiträge Der 20. ÖGA-Jahrestagung: „Land- Und Ernährungswirtschaft 2020" 23. Und 24. September 2010, Universität Für Bodenkultur Wien. Facultas-Verlag, Wien, pp. 149–158.
Stürmer, B., Schmid, E., Eder, M.W., 2011a. Impacts of biogas plant performance factors on total substrate costs. Biomass and Bioenergy 35, 1552–1560. doi:10.1016/j.biombioe.2010.12.030
Stürmer, B., Schmidt, J., Schmid, E., Sinabell, F., 2013. Implications of agricultural bioenergy crop production in a land constrained economy – The example of Austria. Land Use Policy 30, 570–581. doi:10.1016/j.landusepol.2012.04.020
Summer, W., Klaghofer, E., Hintersteiner, K., 1996. Trend in soil erosion and sediment yield in the alpine basin of the Austrian Danube, in: Walling, D.E., Webb, B. (Eds.), Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives: Proceedings of an International Symposium Held at Exeter, UK, from 15 to 19 July 1996. IAHS, Wallingford, pp. 473–479.
Surböck, A., Friedel, J.K., Heinzinger, M., Freyer, B., 2006. Long-term monitoring of different management systems within organic farming and their effects on arable land and landscape. Phase I: Monitoring of the conversion to organic farming, in: Raupp, J., Pekrun, C., Oltmanns, M., Köpke, U. (Eds.), Long-Term Field Experiments in Organic Farming. International Society of Organic Agriculture Research : Köster, Berlin, pp. 183–198.
Svardal, K., Kroiss, H., 2011. Energy requirements for waste water treatment. Water Science & Technology 64, 1355–1361. doi:10.2166/wst.2011.221
Svardal, K., Wandl, G., Papp, M., 2012. Überlegungen zur Energieautarkie der Hauptkläranlage Wien. 45. ESSENER TAGUNG für Wasser- und Abfallwirtschaft „Wasserwirtschaft und Energiewende" vom 14. – 16. März 2012 in Essen, Gewässerschutz – Wasser – Abwasser 1–10.
Szalay, T.A., Moitzi, G., Weingartmann, H., Liebhard, P., 2009. Dieselverbrauch und Arbeitszeitbedarf bei unterschiedlichen Bodenbearbeitungssystemen bei Winterweizen, in: ALVA (Ed.), Landwirtschaft - Grundlage Der Ernährungssicherung: Regional Oder Global? Presented at the ALVA Jahrestagung 2009 „Landwirtschaft - Grundlage der Ernährungssicherung: regional oder global?" Arbeitsgemeinschaft für Lebensmittel- Veterinär- und Agrarwesen (ALVA), Bildungs- und Konferenzzentrum St. Virgil, Salzburg, pp. 163–165.
Szerencsits, M., Kuderna, M., Feichtinger, F., 2011. Zwischenfrüchte für Biogaserzeugung – Verbesserung der Grundwasserqualität. Wasserschutzblatt 4, 6–7.
Tahiro, E., 2002. Untersuchungen von Sommerweizengenotypen unterschiedlicher Herkunft auf Hitze-und Trockenstresstoleranz (Dissertation). Landwirtschaftliche Fakultät der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Halle/Saale.
Taverna, R., Hofner, P., Werner, F., Kaufmann, E., Thürig, E., 2007. CO2-Effekte der Schweizer Wald-und Holzwirtschaft-Szenarien zukünftiger Beiträge zum Klimaschutz (No. 0739), Umwelt-Wissen. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern.
Taylor, C., 2000. Ökologische Bewertung von Ernährungsweisen anhand ausgewählter Indikatoren (Dissertation). Justus-Liebig-Universität Gießen, Gießen.
Tebrügge, F., Düring, R.-A., 1999. Reducing tillage intensity — a review of results from a long-term study in Germany. Soil and Tillage Research 53, 15–28. doi:10.1016/S0167-1987(99)00073-2
Thaler, S., Eitzinger, J., Trnka, M., Dubrovsky, M., 2012. Impacts of climate change and alternative adaptation options on winter wheat yield and water productivity in a dry climate in Central Europe. The Journal of Agricultural Science 150, 537–555. doi:10.1017/S0021859612000093
Thrupp, L.A., 2000. Linking Agricultural Biodiversity and Food Security: the Valuable Role of Agrobiodiversity for Sustainable Agriculture. International Affairs 76, 283–297. doi:10.1111/1468-2346.00133
Tollner, E.W., Barfield, B.J., Haan, C.T., Kao, T.Y., 1976. Suspended Sediment Filtration Capacity of Simulated Vegetation. Transactions of the ASAE 19, 0678–0682. doi:10.13031/2013.36095
Tötzer, T., Loibl, W., Steinnocher, K., 2009. Flächennutzung in Österreich, Jüngere Vergangenheit und künftige Trends. Wissenschaft und Umwelt Interdisziplinär 12, 8–20.
Tremblay, A., Varfalvy, L., Roehm, C., Garneau, M., 2004. The issue of greenhouse gases from hydroelectric reservoirs: from boreal to tropical regions, in: Proceedings. Presented at the United Nations Symposium on Hydropower and Sustainable Development, United Nations, National Development and Reform Commission, China United Nations Department of Economic and Social Affairs World Bank, Beijing, China.
Trnka, M., Eitzinger, J., Semerádová, D., Hlavinka, P., Balek, J., Dubrovský, M., Kubu, G., Štěpánek, P., Thaler, S., Možný, M., Žalud, Z., 2011. Expected changes in agroclimatic conditions in Central Europe. Climatic Change 108, 261–289. doi:10.1007/s10584-011-0025-9
Tropeano, D., de Ploey (eds), J., 1983. Soil erosion on vineyards in the Tertiary piedmontese basin (Northwestern Italy)., in: Rainfall Simulation Runoff and Erosion. Catena Verlag, Braunschweig, Deutschland, pp. 115–127.
Troxler, J., Jeangros, B., Calame, F., 1992. Einfluss der Beregnung auf den Pflanzenbestand, den Futterertrag und den Nährwert von

Naturwiesen im Goms (Oberwallis). Landwirtschaft Schweiz 5, 109–116.

Tukker, A., Huppes, G., Guinée, J.B., Heijungs, R., Koning, A. de, Oers, L. van, Suh, S., Geerken, T., Holderbeke, van M., Jansen, B., 2006. Environmental Impact of Products (EIPRO) Analysis of the life cycle environmental impacts related to the final consumption of the EU-25 (External research report No. EUR 22284 EN), Technical Report Series. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies.

Turner, B.L., Lambin, E.F., Reenberg, A., 2007. The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. PNAS 104, 20666–20671. doi:10.1073/pnas.0704119104

Tüxen, R., 1956. Die heutige potentielle natürliche Vegetation als Gegenstand der Vegetationskartierung, Angewandte Pflanzensoziologie. Zentralstelle für Vegetationskartierung, Stolzenau.

Umweltbundesamt, 2010b. Policiy Paper - 2. Entwurf: Auf dem Weg zu einer nationalen Anpassungsstrategie. Umweltbundesamt und BMLFUW, Wien.

Umweltbundesamt, 2010a. Neunter Kontrollamtsbericht. Umweltbundesamt, Wien.

Umweltbundesamt, 2008. Grundstücksdatenbank [WWW Document]. www.umweltbundesamt.at. URL http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/raumordnung/flchen-inanspruch (accessed 3.11.14).

UNECE, 1999. Control techniques for preventing and abating emissions of reduced nitrogen compounds. UN/ECE executive body for the convention on long-range transboundary air pollution (Working Group on Strategies No. EB AIR/WH 5/1999/9/Rev 1). UNECE, Geneva.

UNEP, 2009. Assessing Biofuels, Towards Sustainable Production and Use of Resources. United Nations Environment Programme (UNEP), Division of Technology, Industry and Economics, Paris, France.

UNEP, 2010. Assessing the Environmental Impacts of Consumption and Production: Priority Products and Materials. A Report of the Working Group on the Environmental Impacts of Products and Materials to the International Panel for Sustainable Resource Management. Hertwich, E., van der Voet, E., Suh, S., Tukker, A., Huijbregts M., Kazmierczyk, P., Lenzen, M., McNeely, J., Moriguchi, Y. UNEP/Earthprint.

Urich, D.C., Sitzenfrei, D.D.R., Kleidorfer, A.-P.D.D.M., Rauch, U.-P.D.D.W., 2013. Klimawandel und Urbanisierung – wie soll die Wasserinfrastruktur angepasst werden? Österr Wasser- und Abfallw 65, 82–88. doi:10.1007/s00506-013-0064-8

Valino, V., Perdigones, A., Iglesias, A., Garcia, J.L., 2010. Effect of temperature increase on cooling systems in livestock farms. Clim Res 44, 107–114. doi:10.3354/cr00915

Van Oijen, M., Jandl, R., 2004. Nitrogen fluxes in two Norway spruce stands in Austria: an analysis by means of process-based modelling. Austrian Journal of Forest Science 121, 167–182.

Vicuna, S., Leonardson, R., Hanemann, M.W., Dale, L.L., Dracup, J.A., 2008. Climate change impacts on high elevation hydropower generation in California's Sierra Nevada: a case study in the Upper American River. Climatic Change 87, 123–137. doi:10.1007/s10584-007-9365-x

Völkl, M., 2008. Borkenkäfer an Douglasie. Forstschutz Aktuell 45, 25–26.

Walther, G.-R., Roques, A., Hulme, P.E., Sykes, M.T., Pyšek, P., Kühn, I., Zobel, M., Bacher, S., Botta-Dukát, Z., Bugmann, H., Czúcz, B., Dauber, J., Hickler, T., Jarošík, V., Kenis, M., Klotz, S., Minchin, D., Moora, M., Nentwig, W., Ott, J., Panov, V.E., Reineking, B., Robinet, C., Semenchenko, V., Solarz, W., Thuiller, W., Vilà, M., Vohland, K., Settele, J., 2009. Alien species in a warmer world: risks and opportunities. Trends in Ecology & Evolution 24, 686–693. doi:10.1016/j.tree.2009.06.008

WBGU, Schellnhuber, H.J., Buchmann, N., Epiney, A., Grießhammer, R., Kulessa, M., Messner, D., Rahmstorf, S., Schmid, J., 2010. Future bioenergy and sustainable land use. Earthscan, London.

WDPA, 2012. World Database on Protected Areas [WWW Document]. URL http://www.wdpa.org/ (accessed 2.14.12).

Wehrli, B., 2011. Renewable but not carbon free. Nature Geoscience 4, 585–586.

Weidema, B.P., Wesnæs, M., Hermansen, J., Kristensen, T., Halberg, N., 2008. Environmental Improvement Potentials of Meat and Dairy Products (JRC Scientific and Technical Reports No. 23491 EN). JRC European Commmission, ipts.

Weinberger, K., 2010. Management von Wetterrisiken in Anbetracht des Klimawandels und der GAP-Reform. Ländlicher Raum 2.

Weinfurter, P., 2004. Waldbau in Österreich auf ökologischer Grundlage. Eine Orientierungshilfe für die Praxis. Landwirtschaftskammer Österreich, Wien.

Welti, N., Bondar-Kunze, E., Singer, G., Tritthart, M., Zechmeister-Boltenstern, S., Hein, T., Pinay, G., 2012. Large-scale controls on potential respiration and denitrification in riverine floodplains. Ecological Engineering 42, 73–84. doi:10.1016/j.ecoleng.2012.02.005

Werner, F., Taverna, R., Hofer, P., Thürig, E., Kaufmann, E., 2010. National and global greenhouse gas dynamics of different forest management and wood use scenarios: a model-based assessment. Environmental Science & Policy 13, 72–85. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2009.10.004

Wetterlund, E., Pettersson, K., Magnusson, M., 2010. Implications of system expansion for the assessment of well-to-wheel CO_2 emissions from biomass-based transportation. International Journal of Energy Research 34, 1136–1154. doi:10.1002/er.1633

Wiebe, K.S., Bruckner, M., Giljum, S., Lutz, C., 2012. Calculating energy-related CO2 emissions embodied in international trade using a global input-output model. Economic Systems Research 24, 113–139. doi:10.1080/09535314.2011.643293

Wiegmann, K., Eberle, U., Fritsche, U.R., Hünecke, K., 2005. Umweltauswirkungen von Ernährung–Stoffstromanalysen und Szenarien (Diskussionspapier No. 7). Öko-Institut e.V. – Institut für angewandte Ökologie, Darmstadt/Hamburg.

Williams, J., Nearing, M., Nicks, A., Skidmore, E., Valentin, C., King, K., Savabi, R., 1996. Using soil erosion models for global change studies. Journal of Soil and Water Conservation 51, 381–385.

Winiwarter, W., Amon, B., Fröhlich, M., Gebetsroither, E., Müller, A., Nakicenovic, N., Ramusch, M., Sporer, M., 2009. reclip:tom – Research for climate protection: technological options for mitigation (No. Endbericht zu Projekt Nr. 1.S2.00007.0.0 in einer ARGE Wien im Auftrag der AIT Austrian Institute of Technology GmbH vormals Austrian Research Centers GmbH – ARC), ARC systems research. Seibersdorf.

WMO, 2010. World Meteorological Organisation Greenhouse Gas Bulletin - The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2009. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.

WRAP, 2009. The Food we waste in Scotland (Final Report). WRAP, Banbury.

WRAP, 2010. A review of waste arisings in the supply of food and drink to UK households. WRAP, Banbury, U.K.

York, R., 2012. Do alternative energy sources displace fossil fuels? Nature Clim. Change 2, 441–443. doi:10.1038/nclimate1451

Zebisch, M., Grothmann, T., Schröter, D., Hasse, C., Fritsch, U., Cramer, W., 2005. Klimawandel in Deutschland–Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme., Climate Change. Umweltbundesamt, Dessau.

Zessner, M., Helmich, K., Thaler, S., Weigl, M., Wagner, K.H., Haider, T., Mayer, M.M., Heigl, S., 2011. Ernährung und Flächennutzung in Österreich. Österr Wasser- und Abfallw 63, 95–104. doi:10.1007/s00506-011-0293-7

Zimmermann, N.E., Jandl, R., Hanewinkel, M., Kunstler, G., Kölling, C., Gasparini, P., Breznikar, A., Meier, E.S., Normand, S., Ulmer, U., Gschwandtner, T., Veit, H., Naumann, M., Falk, W., Mellert, K., Rizzo, M., Skudnik, M., Psomas, A., 2013. Potential Future Ranges of Tree Species in the Alps, in: Cerbu, G., Hanewinkel, M., Gerosa, G., Jandl, R. (Eds.), Management Strategies to Adapt Alpine Space Forests to Climate Change Risks. InTech.

Band 3 Kapitel 3: Energie und Verkehr

Volume 3 Chapter 3: Energy and Transport

Koordinierende Leitautoren
Reinhard Haas, Romain Molitor

LeitautorInnen
Amela Ajanovic, Tadej Brezina, Michael Hartner, Petra Hirschler, Gerald Kalt, Claudia Kettner, Lukas Kranzl, Norbert Kreuzinger, Thomas Macoun, Michael Paula, Gustav Resch, Karl Steininger, Andreas Türk, Sibylla Zech

Beiträge von
Birgit Bednar-Friedl, Helmut Haberl, Stefan Hausberger, Markus Mailer, Andreas Müller

Für den Begutachtungsprozess
Brigitte Bach

Inhalt

ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Kapitel werden auf Basis der vorliegenden Literatur – vorrangig wissenschaftlich begutachtetet („peer-reviewed"), aber auch „graue Literatur" – die wichtigsten treibhausgas-(THG-)spezifischen Entwicklungen in den Bereichen „Energie" und „Verkehr" in Österreich bewertet und Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel sowie den Klimaschutz betreffend dokumentiert.[1]

Der Anteil der energiebedingten THG-Emissionen lag in Österreich von 1990 bis 2011 bei ca. 87 % und war damit unter allen THG-Quellen am größten. Am stärksten gestiegen sind die THG Emissionen in den letzten beiden Dekaden (1990 bis 2010) im Verkehr mit +55 %.

Grundsätzlich sind energiebedingte THG-Emissionen abhängig vom spezifischen THG-Emissionsfaktor der eingesetzten Primärenergie, der Effizienz der Umwandlungstechnologien und der Nachfrage nach Energiedienstleistungen (ED). Davon leiten sich die wichtigsten Klimaschutzmaßnahmen ab: (i) im Bereich der Primärenergie die Forcierung des Einsatzes erneuerbarer Energieträger (EET), deren Potenzial bei 750 bis 1 300 PJ liegt, wovon derzeit ca. 450 PJ genutzt werden; (ii) im Bereich der Umwandlung die Steigerung der Effizienz vor allem bei Raum- und Prozesswärme, bei stromspezifischen Anwendungen in allen Sektoren und bei Fahrzeugen; (iii) die Reduktion der Nachfrage nach ED vor allem im Verkehrssektor durch Stärkung effizienterer Verkehrsmittel (nicht motorisierter Verkehr, öffentlicher Verkehr) sowie eine effiziente Raumplanung sowie die Vermeidung „unsinniger" stromspezifischer Anwendungen, z. B. bei Stand-by-Verlusten.

Die wichtigsten energiepolitischen Instrumente zur Reduktion der THG-Emissionen sind:

- Im Energiesektor (A) THG-basierte Steuern, (B) Verschärfung der thermischen Gebäudestandards sowie jener für Elektrogeräte, (C) eine effiziente weitere (fiskalische) Förderung EET sowie (D) technologische Innovation und Bewusstseinsbildung.
- Im Verkehrssektor ein umfassendes Portfolio aus folgenden Maßnahmen: (A) fiskalische Instrumente; (B) raumplanerische und gesetzliche Maßnahmen; (C) technologische Innovationen bei konventionellen und alternativen Antrieben; (D) Steuerung des Verkehrsflusses und Bewusstseinsbildung.

SUMMARY

From 1990 to 2011, Energy related GHG emissions were the dominant source of Austrian GHG emissions, with a share of about 87 %. The transport sector showed the biggest increase in GHG emissions with 55 % over the last two decades (1990 to 2010).

Energy related GHG emissions depend in principle on: the specific GHG-Emission factor of the primary energy used, the efficiency of the conversion technologies and the demand for energy services. From these impact parameters the following central mitigation measures can be derived: (i) the increased use of renewable energy sources in all sectors with respect to primary energy, which, according to different studies, can potentially increase from the current 450 PJ to between 600 and 1 000 PJ; (ii) the increased efficiency of conversion technologies, especially for room heating and process heat and for specific electric uses in all sectors and for all types of vehicles; and (iii) the reduction of energy intensive services in transport by switching to non-motorized and public transport, spatial planning and reduction of „useless" electricity consumption (e. g. stand-by losses).

The key policy instruments for a reduction of GHG emissions for the energy sector include:

- (A) fiscal instruments like GHG-based taxes; (B) tightening of the efficiency standards for buildings and electric appliances in general; (C) efficient and effective further (fiscal) promotion of renewable energy sources; and (D) technological innovation and awareness raising.
- The transport sector could benefit from a portfolio consisting of: (A) fiscal instruments; (B) spatial planning and legal measures; (C) technological innovations for conventional and new alternative powertrains; and (D) soft measures and awareness raising.

KERNAUSSAGEN

1. Historische Entwicklung des Energieverbrauchs (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage)

Die wichtigsten Aspekte der historischen Entwicklung des Energieverbrauchs in Österreich sind:

- Der Anteil von Öl ist seit ca. 1990 gleichbleibend, jener der erneuerbaren Energieträger (EET) und von Gas hingegen ist seither stark gestiegen.

[1] Anmerkung zu Unsicherheiten: In Bezug auf die dargestellten Szenarien und ihre Bandbreite sowie die Effekte energiepolitischer Instrumente gibt es keine Studie, die sich diesen gewidmet hätte. Darum werden in dieser Arbeit diesbezüglich auch keine Angaben gemacht.

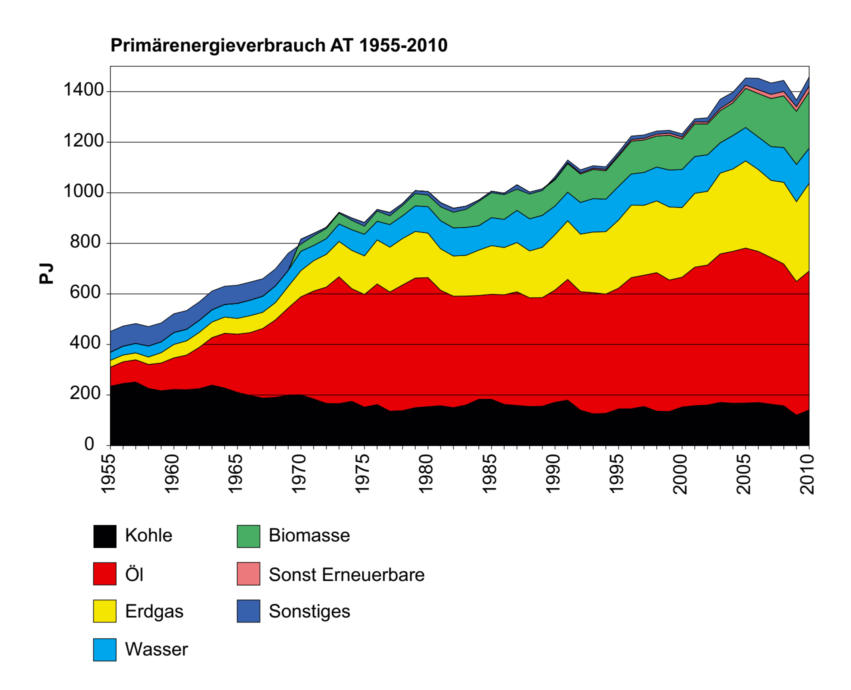


Abbildung 3.1 Entwicklung der Primärenergieversorgung in Österreich von 1955 bis 2011 nach Energieträgern. Quelle: eigene Darstellung nach Datenbank Energy Economics Group und Statistik Austria (2013a)

Figure 3.1 Development of primary energy supply in Austria from 1955 till 2010 by energy carrier. Source: own graph based on the database of the Energy Economics Group and Statistik Austria (2013a)

- Hohe Importabhängigkeit von ca. 70 % seit 1975.
- Seit 2005 kann eine Stagnation von Primär- und Endenergieverbrauch beobachtet werden.
- Anstieg der Anteile von Strom (23 % im Jahr 2011 im Vergleich zu 17 % im Jahr 1990) und Gas (28 % im Jahr 2011 im Vergleich zu 13 % im Jahr 1990).
- Steigerung des Anteils EET an der Primärenergieaufbringung in den letzten Jahren, von ca. 23 % im Jahr 2000 auf ca. 29 % 2011.

2. Option erneuerbare Energiequellen im Bereich der Energieaufbringung (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage)

- Das Potenzial an EET in Österreich insgesamt liegt den verschieden Studien zufolge bis 2050 im Bereich von 750 bis 1 300 PJ, das sind ca. 50 bis 90 % des Primärenergieverbrauchs von 2010.
- Biomasse nimmt unter den erneuerbaren Energieträgern eine spezifische Stellung ein und wird auch in Zukunft eine wichtige Rolle bei der Substitution fossiler Energieträger spielen müssen. Die primärenergetischen Potenziale sind in Österreich jedoch bereits weitgehend erschlossen.
- Beim weiteren Ausbau der energetischen Biomassenutzung ist der Flächen- bzw. Rohstoffbedarf für Nahrungsmittelproduktion und stoffliche Biomassenutzung zu berücksichtigen (zumal eine Substitution fossiler Rohstoffe auch bei stofflichen Produkten erforderlich ist).

3. Optionen im Bereich der Stromversorgung (hohe Übereinstimmung, mittlere Beweislage):

Im Bereich der Stromaufbringung kann bis 2050 – je nach Szenario – bis zu 100 % Deckung durch EET erreicht werden. In Bezug auf die Infrastruktur sind deutliche Veränderungen notwendig, wobei hierbei nahezu alle Subbereiche (Erzeugung, Netz, Speicherung und Verbrauch) betroffen sind. Diese Strukturanpassungen erscheinen aber auch bei maßvoller Weiterentwicklung der energiepolitischen Rahmenbedingungen durchaus erreichbar. Der steigende Anteil EET im Erzeugungsbereich, Smart Grids vor allem auf Verteilnetzebene, neue Stromspeichertechnologien und -kapazitäten sowie Smart Meters bei den Verbrauchern werden die bestehenden Strukturen signifikant verändern und eine weitgehend CO_2-arme Stromversorgung ermöglichen.

4. Optionen im Bereich Heizenergie (hohe Übereinstimmung, mittlere Beweislage):

- Im Bereich der Heizenergieversorgung von Wohngebäuden könnten mittels ambitionierten politischer Maßnahmen die THG-Emissionen bis 2050 am drastischsten gesenkt werden. Am wichtigsten dabei ist eine qualitativ hochwertige thermische Sanierung des Bestands und die optimale Einbindung der Nutzung EET.
- Bei Neubauten wurde in den letzten Jahren ein beträchtlicher technologischer Fortschritt realisiert. In den nächsten Jahren sollte dieser Trend weiter forciert werden; die

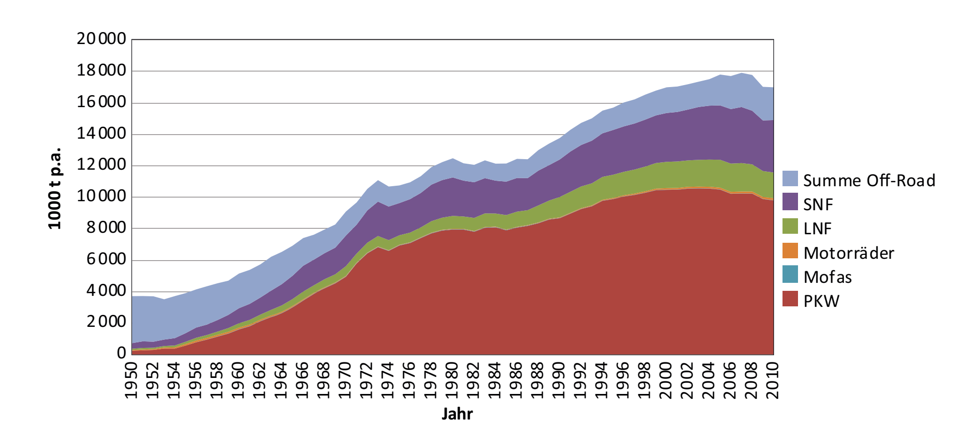


Abbildung 3.2 Historische Entwicklung der CO_2-Emissionen gesamter Verkehr 1950-2010 in Österreich nach Kategorie. Quelle: Hausberger und Schwingshackl (2011)[1]

Figure 3.2 Historical development of CO_2-emissions in transport by mode from 1950 to 2010 in Austria. Source: Hausberger und Schwingshackl (2011)

[1] LNF: Leichte Nutzfahrzeuge (Lieferwagen und Lkw <3,5 t Gesamtmasse); SNF: Schwere Nutzfahrzeuge (Lkw >3,5 t Gesamtmasse und Busse); Off-Road: Eisenbahn (Dampf- und Dieseltraktion, Baumaschinen, Landwirtschaftliche Maschinen, Rasenmäher etc.)

erreichten Kennwerte derjenigen Gebäude mit dem geringsten Energiebedarf bzw. THG-Emissionen sollten der Festlegung von Standards für künftige Neubauten dienen. Im Sinne des mit der europäischen Gebäuderichtlinie (Neufassung) eingeschlagenen Weges ist eine sehr ambitionierte Festlegung von Neubaustandards erforderlich, um langfristige Klimaschutzziele zu erreichen.

- Unter diesen Randbedingungen kann bis 2050 auf Basis EET eine Abdeckung von etwa 70 % des Wärmebedarfs erreicht werden, wobei hier ein breites Portfolio aus Biomasse, Solarthermie, Geothermie und der Nutzung von Umgebungswärme zum Einsatz käme.

5. Optionen im Bereich des Stromverbrauchs (starke Übereinstimmung, mittlere Beweislage):

Der Stromverbrauch wird ohne gravierende politische Eingriffe weiterhin deutlich ansteigen. Zwar wird es durch effizientere Technologien bei bestehenden Anwendungen und der Beleuchtung zu Einsparungen kommen, vor allem durch die weitere Verbreitung neuer stromkonsumierender Anwendungsbereiche bei gleichbleibenden niedrigen (realen) Niveaus der Strompreise wird der Gesamtstromverbrauch zumindest moderat weiter steigen. Das ist das Ergebnis praktisch aller berücksichtigten Szenarien, ausgenommen jener, die eine Reduktion des Stromverbrauchs explizit vorgegeben haben.

6. Die THG-Emissionen im Verkehrssektor (mittlere Übereinstimmung, starke Beweislage):

Der Verkehrssektor war sowohl in Österreich als auch in der EU in den letzten Jahren der Sektor mit der ungünstigsten Entwicklung der THG-Emissionen. Die in den letzten Jahren auf EU-Ebene forcierten regulativen Instrumente – im Wesentlichen Standards für CO_2-Emissionen pro zurückgelegtem km – haben lange Zeit nicht die gewünschten Erfolge gezeigt. Die Gründe dafür waren, dass die gesteigerte Effizienz der Pkw zu einem Großteil durch höhere Fahrleistungen (= gefahrene km) und größere/schwerere Pkw kompensiert wurden.

Wenn die THG insgesamt gesenkt werden sollen, wird im Verkehrsbereich ebenfalls eine substantielle Reduktion der THG-Emissionen erforderlich sein. Dieses setzt eine deutliche Reduktion des Einsatzes fossiler Energie voraus, die nur durch ein konsequent von der Politik umzusetzendes Maßnahmenbündel erreicht werden kann, mit dem die CO_2-Emissionen pro Weg im Personenverkehr bzw. je Transporteinheit im Güterverkehr reduziert werden.

7. Reduktion der Fahrzeugkilometer im Verkehr (mittlere Übereinstimmung, starke Beweislage):

- Weniger Personen- und Güterkilometer durch Maßnahmen, die Gesellschafts-, Wirtschafts- und Siedlungsstrukturen unterstützen, welche es ermöglichen die menschlichen Daseinsgrundfunktionen (Wohnen, Arbeiten, Bildung, Ver- und Entsorgen, Erholung, Gemeinschaft) und wirtschaftlichen Austauschprozesse in geringerer räumlicher Distanz zu erfüllen und somit Nahmobilität fördern.
- Weniger Fahrzeugkilometer pro Personen- und Güterkilometer durch Maßnahmen, die in erster Linie das Zufußgehen und Radfahren fördern, aber auch zu höherer Effizienz im Fahrzeugverkehr führen, etwa mittels höherer Besetzungsgrade durch ÖV und Fahrgemeinschaften, weniger Leerfahrten, weniger Bring-/Holfahrten, weniger Parksuchverkehr, Bedarfsverkehre im ÖV etc.

Dazu gehören zum Beispiel kurz- bis mittelfristige Maßnahmen, wie Angebote im nicht motorisierten Verkehr und im Öffentlichen Verkehr, insbesondere auch im suburbanen und

ländlichen Raum; ökonomische Maßnahmen zur Steuerung bzw. Lenkung der Verkehrsnachfrage im Personen- und Güterverkehr sowie des Verkehrsverhaltens, darüber hinaus die Implementierung von Anwendungen in der Informations- und Kommunikationstechnologie mit dem Ziel eine einfache und barrierefreie Multimodalität zu unterstützen. Weiters sind langfristige Maßnahmen wie etwa die Umsetzung der „Stadt / Region der kurzen Wege", das Erreichen von Mindestgrößen und -dichten für Siedlungen zwecks einer effizienten Erschließung, Innenentwicklung durch verdichtete Bauformen und Mischnutzung oder integrative Standortpolitik zu erwähnen (mittlere Übereinstimmung, starke Beweislage).

8. Weniger fossile Energie pro Fahrzeugkilometer (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage):

- Verbrennungsmotoren mit weniger Verbrauch, durch Maßnahmen, die Fahrzeuge bzw. Motoren mit geringerem spezifischem Verbrauch fördern, etwa durch Senkung von Roll- und Luftwiderstand sowie der Fahrzeugmasse.
- Geringere CO_2-Emission pro Primärenergieeinheit durch Maßnahmen zur Förderung entsprechender alternative Energieträger.
- Energieeffizienter Verkehrsfluss durch Maßnahmen, die zu einer gleichmäßigeren Fahrweise mit weniger Anhalte- und Beschleunigungsvorgängen, weniger Staus und niedrigerer Geschwindigkeit führen.

Dazu gehören zum Beispiel ökonomische Maßnahmen zur Steuerung des spezifischen Energieverbrauchs von Fahrzeugen, ordnungspolitische Maßnahmen wie das Festsetzen von Grenzwerten der spezifischen CO_2-Emissionen der Fahrzeuge oder von wirksamen Geschwindigkeitsbeschränkungen. Ferner Maßnahmen im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologie zur effizienteren Steuerung des verbleibenden Verkehrsflusses von Automobilen oder technologische Maßnahmen wie die verstärkte Einführung von alternativen Antriebssystemen (z. B. Elektro-Antrieb) bzw. von alternativen Kraftstoffen wie Biokraftstoffen, BioCNG oder Wasserstoff.

9. Wichtigste energiepolitische Instrumente insgesamt (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage):

Insgesamt sind die wichtigsten energiepolitischen Instrumente zur Reduktion der THG-Emissionen: CO_2-basierte Steuern, Verschärfung der thermischen Gebäudestandards, verschärfte Standards für Elektrogeräte und effiziente weitere (fiskalische) Förderung EET. Zu letzterem ist anzumerken, dass eine weitere Förderung vom technologischen Fortschritt und von Lerneffekten der Technologien abhängig gemacht werden sollte. Von zentraler Bedeutung sind hier Anreize für die Marktintegration, sowohl bei Strom als auch bei Wärme und Mobilität.

3.1 Energie
3.1 Energy

Energie ist vital für unser Wirtschaftssystem. Sowohl die Produktion von Gütern als auch die Bereitstellung von Dienstleistungen gehen mit dem Einsatz von mehr oder weniger Energie einher. So wurden in Österreich zwischen 1990 und 2011 pro Mrd. € Bruttoinlandsprodukt (BIP) 4,8–5,5 PJ an Primärenergie eingesetzt, wobei kein Trend einer Veränderung erkennbar war.

Aus der Sicht des Klimawandels führt dieser Energieeinsatz allerdings zu gravierenden Problemen, denn die Umwandlung von Primärenergie in Energieträger und weiter in Energiedienstleistungen geht mit der Emission von THG-Emissionen einher. In Österreich lag der Anteil der energieumwandlungsbedingten THG-Emissionen von 1990 bis 2011 bei ca. 87 % und stellt damit den bei weitem größten Anteil an den österreichischen THG-Emissionen dar. Die Ursachen hierfür sind:

- Große Umwandlungsverluste (ca. 50 %) von der Primärenergie bis zur Nutzenergie
- Hoher Anteil – bei ihrer Nutzung THG-emittierender – fossiler Energieträger, derzeit ca. 71 % des österreichischen Bruttoinlandsverbrauchs
- Niedrige Energiepreise: seit 1965 sind diese im Durchschnitt gleich geblieben

Darüber hinaus führen verschiedene weitere Probleme dazu, dass dieses Energie"versorgungs"system derzeit nicht nachhaltig ist. Die wichtigsten sind nach Nakicenovic et al. (2012):

- Hohe Abhängigkeit vom Verbrauch begrenzter fossiler Ressourcen
- Hohe Auslandsabhängigkeit von ca. 90 % beim Verbrauch dieser fossilen Energieträger
- Ungerechte internationale Verteilung beim Verbrauch der Ressourcen. Dies führt zunehmend zu internationalen Spannungen, auch im Kontext von Emissionsrechten und Emissionsreduktion in Bezug auf THG

Das Ziel dieses Kapitels ist eine Bewertung des Wissensstands in Bezug auf das österreichische Energiesystem (Energieauf-

bringung, Energieumwandlung, „Energieverbrauch“[2]) aus der Sicht des Klimawandels. Dazu wird zunächst dargestellt, wie energetische THG-Emissionen verursacht werden, welche Faktoren diese beeinflussen und wie die derzeitige Situation in Bezug auf diese Einflussfaktoren absolut einzuschätzen ist. In Ergänzung dazu erfolgt in Abschnitt 3.1.2 eine Beschreibung der wichtigsten historischen Trends in Bezug auf Energieverbrauch und THG-Emissionen in Österreich. In Abschnitt 3.1.3 werden die wichtigsten Indikatoren des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen für Österreich im internationalen Vergleich dokumentiert und analysiert wie die Position Österreichs im Vergleich zu anderen Ländern einzuschätzen ist.

Bis zu Abschnitt 3.1.3 erfolgt also eine beschreibende Bewertung des österreichischen Energiesystems. Beginnend mit Abschnitt 3.1.4 wird dargestellt, wie dieses und die THG-Emissionen beeinflusst werden können. Dazu werden in den Abschnitten 3.1.4 bis 3.1.7 Klimaschutzmaßnahmen (*Mitigation*) beschrieben, wobei in Abschnitt 3.1.4 ein Überblick gegeben wird, in Abschnitt 3.1.5 Möglichkeiten den Energiemix (und damit die spezifischen THG-Emissionen je Energieeinheit) zu beeinflussen dokumentiert werden, in Abschnitt 3.1.6 Maßnahmen zur Effizienzsteigerung beschrieben werden und in Abschnitt 3.1.7 Szenarien der Entwicklung bei den Anwendungen verglichen werden. Energiepolitische Instrumente, um diese Klimaschutzmaßnahmen praktisch umzusetzen, werden in Abschnitt 3.1.9 erörtert. Optionen für Anpassung (*Adaptation*) an den Klimawandel sind in Abschnitt 3.1.8 dokumentiert. Anforderungen an F&E sowie Schlussfolgerungen beschließen dieses Kapitel.

3.1.1 Wie energierelevante THG-Emissionen verursacht werden

Zunächst werden die wichtigsten grundsätzlichen formalen Zusammenhänge, die zur Emission von THG aufgrund von Energieverbrauch führen, dokumentiert. Ausgangspunkt ist, dass die THG[3]-Emissionen (THG) vom Energieverbrauch (E) und den spezifischen Emissionen des Energiemix (f_{THG}) abhängen (siehe z. B. Howarth und Schipper, 1991; Schipper und Haas, 1997; Haas et al., 2008):

$$THG = E * f_{THG} \qquad (1)$$

[2] Energie kann grundsätzlich natürlich weder „erzeugt“ noch „verbraucht“ sondern nur umgewandelt werden, vgl. Mayer (1845). Aufgrund der weiten Verbreitung dieses Begriffs wird er jedoch auch in dieser Arbeit genutzt.

[3] In diesem Kapitel werden jeweils alle Treibhausgase unter THG subsummiert. Als Einheit wird immer CO_2-Äq. verwendet.

Das zentrale Motiv der Energienutzung: Bereitstellung von Energiedienstleistungen

Ein weiterer wichtiger Aspekt für die Analysen in diesem Kapitel ist die Feststellung, dass nicht Energie nachgefragt wird, sondern Energiedienstleistungen (im Folgenden mit S für Service bezeichnet), vgl. Köppl et al. (2011) oder Haas et al (2008). Das heißt, es geht nicht darum, Benzin, Kohle oder Heizöl an sich zu verbrauchen, sondern darum, mit Energie und Effizienz von Technologien die Energiedienstleistungen Mobilität, warme und behagliche Räume, helle Arbeitsplätze, rechnende und nicht heizende IT-Geräte bereitzustellen. Dieser Aspekt der Energiedienstleistung wird in der Literatur nicht immer explizit erwähnt, vgl. z. B. Erdmann und Zweifel (2008).

Energiedienstleistungen können im Allgemeinen aus einem Mix aus Technologien (z. B. Heizsystem und Wärmedämmung) und Energie bereitgestellt werden (wenn wir die weiteren Inputs wie menschliche Arbeit oder Umwelt als konstant betrachten). Je effizienter die Umwandlungstechnologie, umso geringer der notwendige Energieeinsatz, um die gleiche Energiedienstleistung bereitzustellen.

Die energiebedingten THG-Emissionen sind also letztendlich abhängig von der Nachfrage nach Energiedienstleistungen (Services) S, der Effizienz der Umwandlungstechnologie h(T) und dem spezifischen THG-Emissionsfaktor f_{THG}: (vgl. Box 3.1)

$$THG = (S / \eta (T)) * f_{THG} \qquad (2)$$

Daraus abgeleitet folgt, dass es die folgenden drei Ansätze gibt, die energetischen THG-Emissionen zu verringern (Weitere Details Abschnitt 3.2.4):

- Einfluss auf f_{THG}
- Einfluss auf η
- Einfluss auf S

Das Energiesystem Österreichs und die korrespondierenden THG-Emissionen

Nur in wenigen Fällen, wie bei der traditionellen Nutzung der Wasserkraft (Wassermühlen) und des Windes (Segelschiffe, Windmühlen), der geothermischen Energienutzung und der thermischen Nutzung der Solarenergie, steht Energie bereits in transienten Formen bereit, sodass direkt mit Hilfe einer Anwendungstechnologie Energiedienstleistungen bereit gestellt werden können. In den meisten Fällen kann ein Primärener-

Box 3.1: Wie die Nachfrage nach Energiedienstleistungen zu THG-Emissionen führt
Box 3.1: How the demand for energy services causes GHG emissions

Technisch werden Energiedienstleistungen (S), wie etwa behaglich temperierter und beleuchteter Raum oder Mobilität durch zumindest drei Inputs bereitgestellt: Durch Energie (E), durch eine Technologie (T) die über ihre Effizienz η definiert wird und durch einen Verbrauch von Umwelt, in unserem Kontext z.B. THG:

$$S = f(E, \eta(T), THG) \quad \text{(Gleichung 3.1.1)}$$

Kurzfristig, vorausgesetzt einer bestimmten Infrastruktur, kann dieser Zusammenhang einfacher aus dem Produkt von E und η (T) wie folgt dargestellt werden

$$S = E\eta(T) \quad \text{(Gleichung 3.1.2)}$$

und

$$THG = E * f_{THG} \quad \text{(Gleichung 3.1.3)}$$

Die konsumierte Menge an Energiedienstleistungen hängt ab vom individuellen Nutzen dieses Services (u[s]), vom Einkommen (Y, dem Preis der Energiedienstleistung (p_s) und den Kapitalkosten (CC)

$$S = f(p_S, CC, Y, u(s)) \quad \text{(Gleichung 3.1.4)}$$

wobei sich der kurzfristige Preis der Energiedienstleistung (ps) ergibt aus:

$$p_S = p_E / \eta(T) \quad \text{(Gleichung 3.1.5)}$$

p_E Energiepreis
$\eta(T)$ Effizienz

Anmerkung: Aus diesen Zusammenhängen werden auch bereits einige Probleme energiepolitischer Maßnahmen offensichtlich. So zeigen die Gleichungen 3.1.2, 3.1.4 und 3.1.5, dass Energiedienstleistungen durch technische Maßnahmen zwar effizienter bereit gestellt werden können, aber auch das Niveau des Service-Bedarfs von η(T) abhängt (Gleichung 3.1.4 und 3.1.5). Dies führt zum sogenannten *Rebound-Effekt*.

Aus Gleichung 3.1.2 und 3.1.3 ergibt sich der Zusammenhang:

$$THG = (S / \eta(T)) * f_{THG} \quad \text{(Gleichung 3.1.6)}$$

gieträger jedoch erst nach einem oder mehreren Umwandlungsschritten genutzt werden.

Dies führt zum Begriff der Energieumwandlungsketten. Ausgehend von der verfügbaren Primärenergie (Öl, Kohle, Biomasse, Uran, Gas, Solar) und der Nachfrage nach End- bzw. Nutzenergie ist nun die Frage, wie viel Energie letztendlich wirklich nutz. B.ar verwendet wird. Denn eines der zentralen Probleme der Nutzung von Energie sind die in der langen Kette von der Erschließung von Primärenergie (z. B. Abbau von Kohle, Gewinnung von Erdöl) bis zur Bereitstellung einer ED auftretenden Verluste (vgl. Abbildung 3.3). Diese sind natürlich von der Effizienz h (T) der Umwandlungstechnologie auf der jeweiligen Stufe abhängig.

Die Verknüpfung, Verkettung und Kombination von Energieketten bzw. die Interaktion zwischen diesen bezeichnen wir als „Energiesystem“ (vgl. Nakicenovic, 1996). Das heißt, ein Energiesystem umfasst innerhalb bestimmter Systemgrenzen alle Flüsse, Umwandlungen wie auch Nutzungen verschiede-

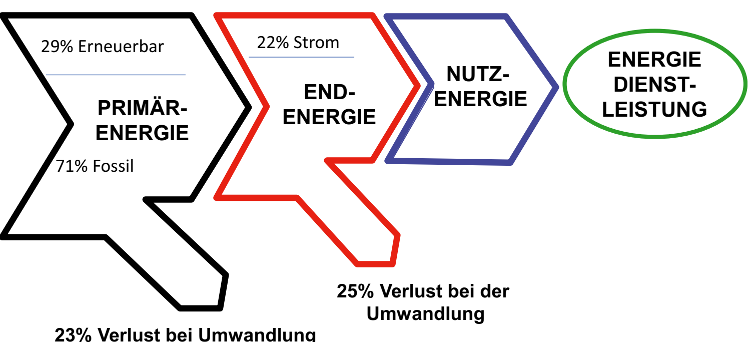


Abbildung 3.3 Die Elemente der Energiekette; Beispiel für die Verluste in Österreich. Quelle: eigene Darstellung nach Statistik Austria (2013a)

Figure 3.3 Parts of the energy chain; Example for Losses in Austria. Source: own graph based on Statistik Austria (2013a)

ner Energiequellen und -träger. Energiesysteme können auf verschiedenen Aggregationsniveaus beschrieben werden: Gebäude, Siedlung, Region, Stadt etc.

Die Verluste fallen sowohl bei der Umwandlung von Primär- in Endenergieträger (z.B. Kohle zu Elektrizität oder Wärme) als auch bei der Umwandlung von Endenergieträger in Nutzenergie an (z.B. Elektrizität zu Licht oder Diesel zu Mobilität). Die Wirkungsgrade der einzelnen Technologien auf beiden Umwandlungsstufen werden ständig verbessert, unterliegen aber auch den physikalischen Grenzen der Thermodynamik, die Verluste unvermeidbar machen. Typische Wirkungsgrade im Bereich der thermischen Kraftwerke zur Stromerzeugung liegen zwischen 25 % (altes Kohlekraftwerk) und 60 % (neue Gas- und Dampfkraftwerke) und bis zu 90 % bei Heizkraftwerken und Kraft-Wärme-Kopplung (KWK). Bei den erneuerbaren Energien Wasserkraft, Geothermie, Wind und Photovoltaik wird nach den IPCC Konventionen ein Wirkungsgrad von 100 % angesetzt, da bei der Nutzung keine direkten Ressourcen verbraucht werden. Unter diesen Annahmen führt ein Umstieg auf diese Energieträger zu einer Steigerung der Umwandlungseffizienz von Primärenergie auf Endenergie.

Im Bereich der Umwandlung von Endenergie in Nutzenergie hängt der Wirkungsgrad sehr stark vom Anwendungsbereich ab. Während Technologien zur Bereitstellung von Wärme Wirkungsgrade bis über 90 % erreichen, zeigen andere Bereiche wie etwa die Umwandlung von Strom in Licht (4 % bei Glühbirnen, 20 % bei Energiesparlampen) oder von Treibstoff in Traktion (25–40 % bei konventionellen Motoren) weit geringere Wirkungsgrade. Zu den Umwandlungsverlusten kommen noch Verluste bei der Verteilung (z.B. Netzverluste bei der Stromübertragung), der Eigenverbrauch des Sektors Energie zum Betrieb der Erzeugungs- und Verteilungsanlagen und die Nutzung von Primärenergieträgern für nicht energetische Zwecke (z.B. chemische Industrie).

Auf der letzten Stufe der Energiedienstleistungen sind Verluste nur schwer zu quantifizieren. Hier geht es eher um den Vergleich möglicher Bereitstellungsketten (z.B. gefahrene Personenkilometer mit Bahn bzw. PKW, Reduktion des Energiebedarfs für Beleuchtung durch die intelligente Nutzung des Tageslichts) zur Befriedigung der Dienstleistung. Lebenszyklusanalysen der einzelnen Möglichkeiten, welche die Energieflüsse zur Bereitstellung der Nutzenergie berücksichtigen, sind hier geeignete Methoden um die Auswirkungen auf den Energiebedarf zu bewerten. Im Rahmen dieses Kapitels liegt der Fokus allerdings auf der Effizienz der dahinter liegenden Energieketten. Sprich in den folgenden Analysen wird die Bereitstellung von Energiedienstleistungen quantitativ im Detail nicht weiter verfolgt, vor allem auch, weil dafür praktisch keine Daten verfügbar sind.

Die Bewertung des österreichischen Energiesystems beginnt mit der Dokumentation der Energiekette in Abbildung 3.3. Dementsprechend lag der Primärenergie-Einsatz 2010 bei ca. 1 476 PJ, davon entfielen ca. 29 % auf erneuerbare Energieträger (EET) und der Rest auf fossile Energieträger. Bis zur Umwandlung in Endenergie gingen ca. 23 % an Energie verloren, bis zur Nutzenergie weitere 25 %. Die korrespondierenden THG-Emission von 64 Mio. t CO_2-Äq. im Jahr 2010 zeigt Abbildung 3.4. Der größte Anteil von über 50 % entfällt auf Erdöl, gefolgt von Erdgas mit ca. 30 %. Für den spezifischen THG-Emissionsfaktor f_{THG} ergibt sich für 2010 ein Wert von 44 t CO_2-Äq./TJ.

3.1.2 Historische Charakteristika desnergieversorgungssystems und der korrespondierenden THG-Emissionen in Österreich

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Fakten zum Energieeinsatz, sowie die damit verbundenden THG-Emissionen, in Österreich beschrieben. Weiters dokumentieren wir die

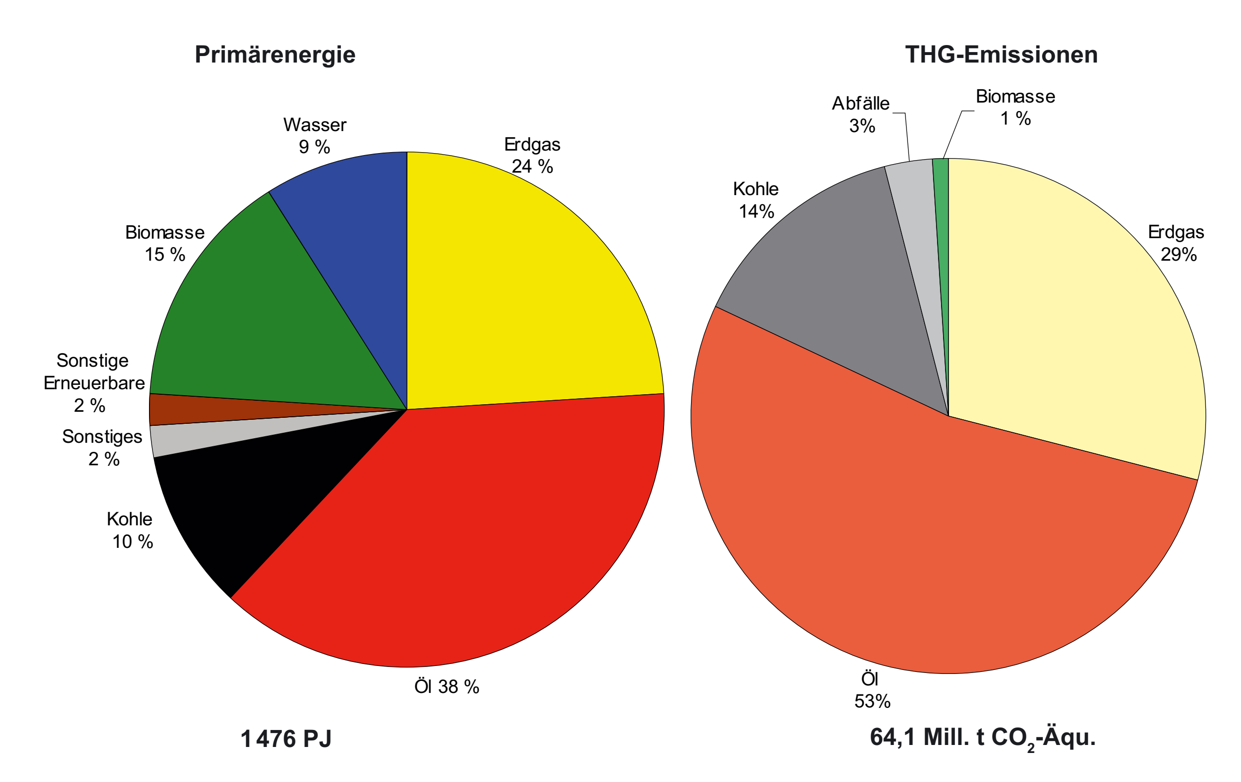


Abbildung 3.4 Primärenergieverbrauch und THG-Emissionen in Österreich 2010 nach Energieträgern. Quelle: eigene Darstellung nach Statistik Austria (2013a) und Umweltbundesamt (2013)

Figure 3.4 Development of primary energy consumption and energy related Greenhouse gas emissions in Austria 2010 by energy carrier. Source: own graph based on Statistik Austria (2013a) and Umweltbundesamt (2013)

wichtigsten Indikatoren, welche die Höhe des Energieeinsatzes (z. B. Energie vs. BIP, Energie vs. Energiepreis) und des Stromverbrauchs beeinflussen. Details zu den Bilanzierungsregeln finden sich in der Standarddokumentation zu Energiebilanzen der Statistik Austria (2013a). Die Daten zu THG-Emissionen der Energieträger wurden vom Umweltbundesamt zur Verfügung gestellt und richten sich nach den IPCC Bilanzierungsvorschriften.

Energieverbrauch in Österreich

Primärenergie

Die Entwicklung des Primärenergieverbrauchs in Österreich von 1955 bis 2011 zeigt Abbildung 3.5.[4] Im Jahr 2011 betrug der gesamte Bruttoinlandsverbrauch an Primärenergie in Österreich ca. 1 430 PJ. Seit 1955 hat sich der Energieeinsatz damit mehr als verdreifacht, was einer durchschnittlichen Wachstumsrate von ca. 2,1 % p.a. entspricht. Abbildung 3.5 zeigt allerdings auch eine Stabilisierung des Primärenergiebedarfs von 2005 bis 2011 mit einem signifikanten kurzfristigen Einbruch im Jahr 2009, der auf die geringere Produktion im Zuge der Wirtschaftskrise zurückzuführen ist. Die Stagnation der letzten Jahre ist vor allem auf folgende Faktoren zurückzuführen: Effizienzgewinne bei Umwandlungs- und Nutzungstechnologien, die Steigerung des Anteils erneuerbarer Energieträger[5] (EET) sowie generell geringe Wachstumsraten des BIP.

Während des gesamten Betrachtungszeitraums zeigt sich die Dominanz fossiler Energieträger, deren Anteil stets mehr als 70 % des Primärenergieeinsatzes betrug. Der Höchststand wurde im Jahr 1972 vor der ersten Ölkrise erreicht, als bedingt durch einen starken Anstieg des Erdölverbrauchs der Anteil der fossilen Energieträger mehr als 88 % betrug. Seither sank der Anteil fossiler Energieträger bis auf 70 % im Jahr 2011. In absoluten Zahlen legte der Verbrauch fossiler Energieträger

[4] Die fossilen Energieträger und biogenen Brennstoffe gehen jeweils mit ihrem Heizwert in den Primärenergieverbrauch ein. Der Einsatz von Wasserkraft, Photovoltaik und Wind wird mit dem Umwandlungsausstoß bilanziert (100 % Wirkungsgrad).

[5] Aufgrund der Bilanzierung mit den in der obigen Fußnote beschriebenen Bilanzierungsregeln kommt eine Steigerung des Anteils EET einem Effizienzgewinns im Vergleich zu fossilen Energieträgern gleich – Der Effizienzgewinn durch EET ist im Sinne eines geringeren Verbrauchs von endlichen Ressourcen zur Bereitstellung von Endenergie zu verstehen und nicht als Steigerung des Wirkungsgrades einer konkreten Umwandlungstechnologie.

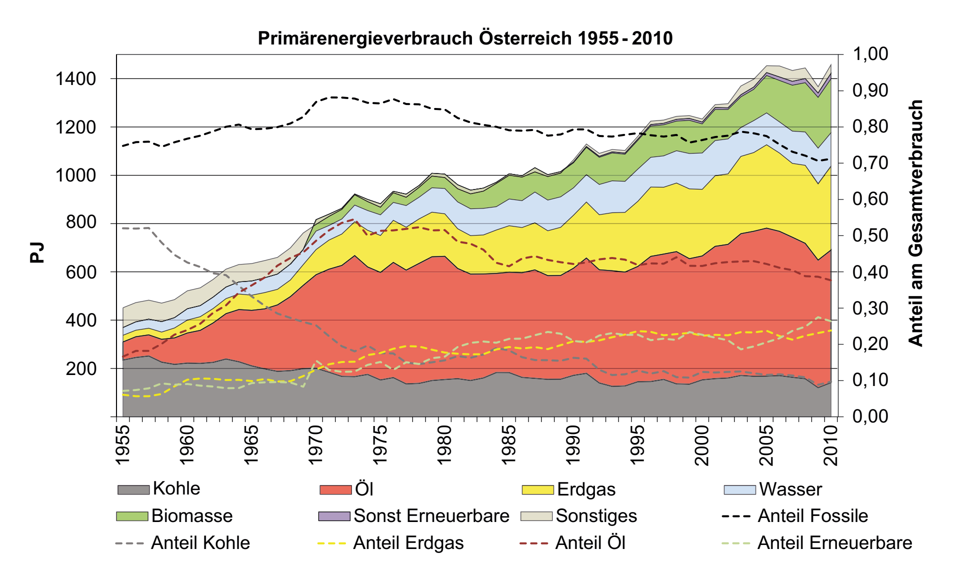


Abbildung 3.5 Entwicklung des Primärenergieverbrauchs von 1955 bis 2011 nach Energieträgern in Österreich. Quelle: Statistik Austria (2013a)[2]

Figure 3.5 Development of primary energy consumption from 1955 till 2011 by energy carrier in Austria. Source: Statistik Austria (2013a)[2]

[2] Eine konsistente Zeitreihe von 1955 bis 2011 ist praktisch unmöglich. Vor 1970 wurden sonstige EET und Biomasse unter „Sonstiges" bilanziert.

von ca. 750 PJ auf ca. 1 000 PJ im Jahr 2011 um 33 % bzw. < 1 % p.a. zu.

Innerhalb der fossilen Energieträger gab es signifikante Trends, die auf eine Substitution innerhalb der fossilen Brennstoffe hinweisen. Der Energieträger Kohle wies sowohl anteilsmäßig (von > 50 % 1955 auf < 10 % 2011) als auch absolut (von 245 PJ auf 145 PJ) einen Rückgang auf. Während der Einsatz von Kohle in Hochöfen, Kokereien und Kraftwerken relativ konstant war, ging vor allem die Bedeutung der Kohle als Endenergieträger zur Wärmebereitstellung in privaten Haushalten und im öffentlichen Dienstleistungsbereich zurück. Dazu ist zu beachten, dass es im Bereich der Stromversorgung aufgrund von geringen CO_2-Preisen aktuell ein Trend in Richtung eines steigenden Einsatzes von Kohle im Vergleich zu Erdgas zu verzeichnen ist, der aus klimapolitischer Sicht sehr kritisch zu sehen ist.

Der Bedarf an Erdöl bzw. an Mineralölprodukten generell hat sich von 1955 bis 2011 mehr als versiebenfacht, wobei der Großteil des Anstiegs bereits vor der ersten Ölkrise stattfand, als Erdölprodukte alleine mehr als 55 % der österreichischen Primärenergieversorgung abdeckten. Seither ist der Anteil auf ca. 38 % gesunken. Absolut gab es seit 1972 einen nur geringen Zuwachs von ca. 15 % bzw. 0,5 %/Jahr von 450 PJ auf aktuell 517 PJ. Dieser Zuwachs ist fast ausschließlich auf den Verkehrssektor zurückzuführen, während in anderen Bereichen (Produktion, Stromerzeugung, Heizöl) die Bedeutung von Erdöl generell abnimmt. Tendenziell ist aber auch der absolute Erdölbedarfs Österreichs seit dem Jahr 2005 rückläufig.

Gas ist der einzige fossile Energieträger, dessen Anteil am Primärenergieverbrauch sich auch nach der Ölkrise kontinuierlich erhöhte. Im Jahr 2010 lag der Anteil mit ca. 350 PJ bei knapp 24 %. Der Anstieg begründet sich sowohl durch einen verstärkten Umwandlungseinsatz, v. a. im Bereich der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) und Heizwerke zur Bereitstellung von Wärme und Strom, als auch durch einen Anstieg zur Bereitstellung von Prozess- und Raumwärme.

Die Entwicklung der EET wird später in diesem Kapitel detailliert behandelt, sie wird hier nur kurz zusammen gefasst. In Abbildung 3.5 ist ein Anstieg der Bedeutung von EET zu erkennen, wobei ein Großteil auf Wasserkraft und die Nutzung der Biomasse zurückzuführen war und nur ein geringer Anteil auf neue Formen wie Wind, PV und Geothermie.[6]

Im Jahr 2011 betrug der Anteil von EET am gesamten Primärenergieeinsatz etwas mehr als 26 %. Weiters zeigt sich, dass der Anteil von EET vor allem nach den beiden Ölkrisen bzw. als Reaktion auf den starken Anstieg der Ölpreise nach der Jahrtausendwende anstieg. Dazwischen gab es keine nennenswerten Veränderungen im Anteil am Primärenergieeinsatz. In absoluten Zahlen erhöhte sich die Produktion aus EET zwischen 1970 und 2011 von ca. 120 PJ auf 394 PJ.

Beim Primärenergieaufkommen ist festzustellen, dass dieses vor allem bei den fossilen Energieträgern durch Importe gedeckt werden muss. In den letzten Jahren war eine Stagnation festzustellen, die auf die verstärkte Nutzung regionaler erneuerbarer Energiequellen (100 % Inlandserzeugung bei Wasser, Wind, PV; 83 % bei Biomasse) in Verbindung mit einem geringen Wachstum des Aufkommens zurückzuführen ist. Bei den fossilen Energieträgern besteht eine nennenswerte Inlandserzeugung bei Öl (7,4 %) und Gas (12 %) während bei Kohle

[6] Daten für Biomasse standen erst ab dem Jahr 1970 zur Verfügung, was den Sprung im EET-Anteil ab 1970 erklärt. Davor wurde der Biomasseanteil zu den sonstigen Energieträgern gezählt.

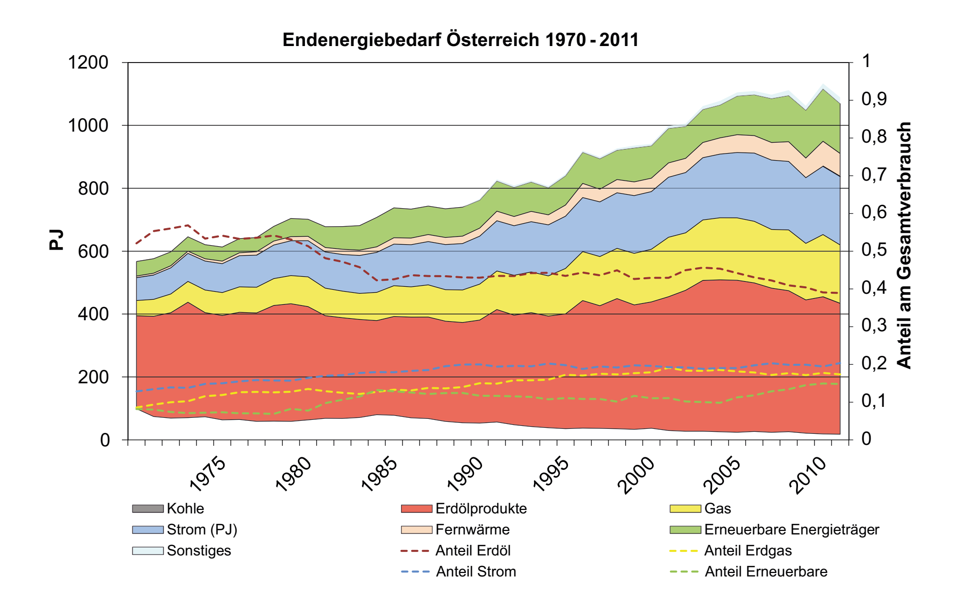


Abbildung 3.6 Entwicklung des Endenergiebedarfs Österreichs nach Energieträgern von 1970 bis 2011. Quelle: Statistik Austria (2013a)

Figure 3.6 Development of final energy consumption in Austria from 1970 till 2011 by energy carrier. Source: Statistik Austria (2013a)

fast der gesamte Bedarf importiert werden muss.

Die Primärenergieträger können nun entweder direkt als Endenergieträger bereit stehen (z. B. Kohle für Kohleheizungen) oder über Umwandlungsschritte (Strom und Fernwärme aus Erdgas) als transformierte Energieträger zur Endenergienutzung bereit gestellt werden. Bei der Umwandlung ergeben sich Verluste (hauptsächlich in Form von nicht genutzter Abwärme, Transportverlusten und des Eigenverbrauchs des Energieumwandlungssektors), die sich nach Abzug des Endenergieeinsatzes und des nicht-energetischen Verbrauchs von Energieträgern (ca. 8 % des Primärenergieträgereinsatzes) vom Primärenergieeinsatz ergeben. Diese Verluste bzw. der energetische Aufwand zur Bereitstellung der Endenergie sind ein Maß für die Effizienz der Bereitstellung von Endenergie wie z. B. Strom oder Fernwärme.

Endenergie

Nach Abzug der Verluste und des nicht energetischen Verbrauchs von Energieträgern ergibt sich der Endenergiebedarf. Dieser wird nach Energieträgern und Wirtschaftssektoren aufgeschlüsselt. Hier ist zu beachten, dass die Energieträger im Endenergiebedarf sowohl primäre Produkte (z. B. Erdgas oder Brennholz zur Bereitstellung von Raumwärme) als auch sekundäre, bereits umgewandelte Energieträger (z. B. Strom oder Fernwärme) darstellen. Für eine ökologische Bewertung ist bei Sekundärprodukten die Betrachtung des Energiemix der Primärträger (z. B. Strom mit einem EET-Anteil von ca. 65 % bzw. Fernwärme mit einem EET-Anteil von 46 %[7]) zur Bereitstellung des Endenergieträgers essentiell.

[7] Die Anteile entsprechen der Berechnung nach EU-Richtlinien. Quelle: Statistik Austria (2013a)

Die Entwicklung des Endenergiebedarfs von 1970 bis 2011 ist in Abbildung 3.6 dokumentiert. Konsistente Zeitreihen vor 1970 sind hier nicht verfügbar. Der Bedarf stieg von 570 PJ im Jahr 1970 auf 1 090 PJ im Jahr 2011 um 92 % bzw. durchschnittlich 1,6 % / Jahr. Auch hier zeigt sich ein relativ stabiler Verlauf seit dem Jahr 2003. Dies ist einerseits auf den Einsatz effizienterer Technologien im Endanwendungsbereich und andererseits auf die relativ geringen Wachstumsraten in der Güterproduktion in den letzten Jahren zurückzuführen.

Aus Sicht der Energieträger ergeben sich unterschiedliche Trends. Seit 1970 sind die Anteile von Strom und Gas am Endenergiebedarf auf jeweils etwa 20 % gestiegen. In den letzten 20 Jahren waren diese aber nahezu konstant, was einem absoluten Anstieg von 152 PJ auf 217 PJ bei Strom bzw. 114 PJ auf 185 PJ bei Gas seit 1990 entspricht. Der direkte Anteil EET ist vor allem in den letzten sieben Jahren gestiegen und betrug im Jahr 2011 ca. 15 %. Allerdings sind auch in den Energieträgern Strom und Fernwärme Anteile EET inkludiert. Der Anteil von Erdölprodukten zeigt zwar in den letzten Jahren einen leicht rückläufigen Trend, hatte aber im Jahr 2011 mit 39 % noch immer den größten Anteil am gesamten Endenerigebedarf. Die Bedeutung von Kohle als Endenergieträger ist hingegen nur noch marginal.

Die Bedeutung von Strom als Energieträger nahm sowohl absolut (von 73 PJ im Jahr 1970 auf 217 PJ im Jahr 2011) als auch relativ (von 13 % auf 20 %) zu. Dies entspricht einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate von 2,7 %. Praktisch alle Sektoren verzeichneten einen Zuwachs wobei vor allem der Verbrauch der Haushalte, des Dienstleistungssektors aber auch des produzierenden Bereichs stark anstieg. Zum Teil ist dieser Zuwachs auf einen Anstieg elektronischer Geräte im

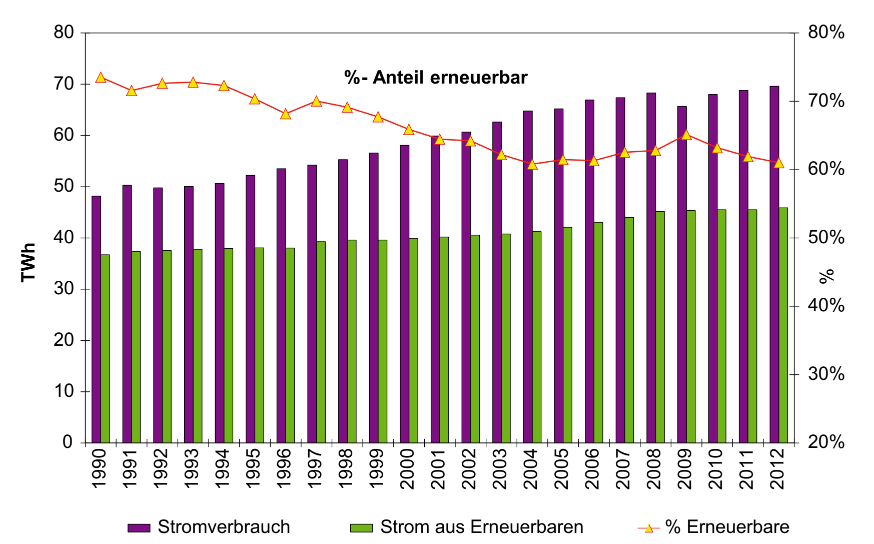


Abbildung 3.7 Absolute (in TWh) und relative Stromerzeugung (in %) aus erneuerbaren Energieträgern und Stromverbrauchsentwicklung in Österreich 1990 bis 2012. Quelle: www.e-control.at

Figure 3.7 Absolute and relative electricity generation from renewable energy sources and electricity consumption in Austria 1990 till 2012. Source: www.e-control.at

Haushalts- und Dienstleistungsbereich (z. B. Informationstechnologien) zurückzuführen, zum Teil wurden aber auch im Industriebereich andere Energieträger durch Strom substituiert (z. B. Ersatz von Brennstoffbetriebenen Standmotoren durch Elektromotoren). So wie der Gesamtenergiebedarf stagnierte auch der Strombedarf in allen Sektoren ab dem Jahr 2006.

Die Stromerzeugung aus EET ist seit 1990 ebenfalls gestiegen, die Stromnachfrage allerdings noch stärker (vgl. Abbildung 3.7). Das hat dazu geführt, dass der Anteil der EET von 1970 bis 2004 von 72 % auf 61 % gesunken ist, danach ist er – vor allem aufgrund der Ökostromförderung – wieder auf 64 % bis 2011 angestiegen, wobei hier alleine die Wasserkraft einen Anteil von 55 % an der gesamten Stromerzeugung hat. Seit den 1990er Jahren ist der Anteil der Wasserkraft jedoch nicht mehr nennenswert gestiegen. Zum einen sind die bestehenden Potentiale zum Großteil bereits genützt, zum anderen stoßen neue Wasserkraftprojekte auf teilweise großen Widerstand durch AnrainerInnen bzw. UmweltschützerInnen. Der Anteil von Windstrom (ca. 7 PJ) am gesamten Strombedarf lag 2011 bei ca. 3 %. Strom aus Photovoltaik (0,6 PJ) spielt mit unter 1 % in Österreich eine sehr untergeordnete Rolle; Stromproduktion aus Geothermie ist mit 3,6 TJ Jahreserzeugung praktisch nicht vorhanden. Zu beachten sind hier allerdings die enormen Steigerungsraten dieser Energieträger. So stieg etwa die jährliche Produktion aus Wind und PV seit 2001 von 0,4 PJ auf 7,6 PJ um mehr als das zwanzigfache.

Der Anteil von Fernwärme am Endenergiebedarf ist seit 1970 von praktisch null auf 73 PJ bzw. knapp 7 % des Endenergiebedarfs im Jahr 2011 gestiegen. Das durchschnittliche Wachstum der Fernwärme seit dem Jahr 2000 lag bei ca. 5 %/Jahr, was vor allem auf eine starken Anstieg des Verbrauchs im Bereich der Dienstleistungen und Haushalte zurück zu führen ist. Der Anteil erneuerbarer Energieträger im Bereich der Fernwärme lag 2011 bei ca. 46 %. Als Energieträger kamen hier hauptsächlich Holzabfälle (31 PJ bzw. 39 % der gesamten Fernwärmeerzeugung) zum Einsatz. Auf Seiten der fossilen Energieträger zur Fernwärmeproduktion dominierte Erdgas mit ca. 38 % der Gesamterzeugung. Kohle und Öl spielten nur eine untergeordnete Rolle bei der Bereitstellung von Fernwärme. Der Großteil der Produktion (mehr als 60 %) stammte aus KWKs.

Nutzenergie

In diesem Abschnitt wird kurz auf Nutzung von Energie in unterschiedlichen Anwendungskategorien eingegangen. Eine detaillierte Betrachtung der verschiedenen Sektoren und Anwendungen bis hin zur Energiedienstleistung wäre aufgrund der vielzähligen Anwendungsbereiche zu umfangreich. Zudem sind dazu sehr wenige Daten vorhanden, da meist nur der Energieträgereinsatz, nicht aber die daraus gewonnene Nutzenergie und nur in sehr wenigen Bereichen – z. B. gefahrenen Kilometern – ein Minimum an Information für Dienstleistungen bilanziert wird.

Hier wird nur ein grober Überblick über die Nutzungskategorien und die Anteile der Endenergieträger gegeben. Weiters wird wegen der Datenlage auf die Darstellung der historischen Entwicklung verzichtet und nur der Status quo im Jahr 2011 dargestellt. Die Daten beziehen sich auf die Nutzenergieanalyse der Statistik Austria (2013b).

Abbildung 3.8 zeigt den Endenergiebedarf im Jahr 2011 nach Nutzenergiekategorie. In Österreich werden folgende Verwendungszwecke unterschieden:

- Mechanische Arbeit
- Prozesswärme (Industrie)
- Raumheizung und Warmwasser
- Mobilität (Traktion)
- Beleuchtung und EDV

Mit fast 34 % des Endenergieverbrauchs entfiel hier der größte Anteil auf den Bereich der Traktion (Transport, Individualverkehr, Flugverkehr, Eisenbahn, öffentlicher Verkehr). Gleichzeitig wies dieser Bereich auch den höchsten Anteil fossiler Brennstoffe auf (91 %). Details zu dieser Thematik folgen im Abschnitt 3.2 zu Verkehr.

In der Kategorie Raumheizung und Klimaanlagen[8] (ohne Warmwasser) ergab sich ein Endenergiebedarf von 330 PJ, was etwa 30 % des Endenergiebedarfs entspricht. Der Großteil entfiel hier auf Haushalte (189 PJ) und den Dienstleistungsbereich (89 PJ), der Anteil des produzierenden Bereichs war relativ gering (43 PJ). Der bei weitem größte Anteil (>95 %) entfiel auf Wärme, während die Klimatisierung mit Ausnahme von Bürogebäuden eine eher untergeordnete Rolle spielt. Abbildung 3.8 zeigt einen heterogenen Mix an Energieträgern in diesem Bereich. Für eine Substitution fossiler Energieträger steht also eine Vielzahl an Möglichkeiten zur Verfügung. Tatsächlich zeigt sich ein eindeutiger Trend weg von Kohle (beinahe vollständig) und Heizöl hin zur Fernwärme, Umgebungswärme, Biomasse und Erdgas. Theoretisch wäre hier eine vollständige Verdrängung fossiler Energieträger (auch Erdgas) denkbar, wobei die ökologischen Folgen beim Einsatz von Fernwärme und Wärmepumpen von den vorgelagerten Prozessen zur Wärme- bzw. Stromproduktion abhängen. Hinzu kommt ein großes Potential für die Reduktion des Wärmebedarfs durch Maßnahmen im Gebäudebereich.

Für Prozesswärme wurden im Jahr 2011 ca. 237 PJ aufgewendet. Darunter fallen Anwendungen im produzierenden Bereich (72 %) in Industrieöfen und zur Dampferzeugung sowie der Energiebedarf der Haushalte (16 %) zur Bereitstellung von Warmwasser und zum Kochen sowie im Dienstleistungssektor (10 %) und der Landwirtschaft (2 %).

Im Haushaltsbereich wurden alleine für die Bereitstellung von Warmwasser 30 PJ aufgewendet, wobei etwa 37 % über fossile Energieträger gedeckt wurden. Auch hier gibt es eine Vielzahl von Substitutionsmöglichkeiten. Im Industriebereich dominierte Erdgas (42 %) als Energieträger sowohl bei der Dampferzeugung als auch bei den Industrieöfen. Der verbliebene Anteil von Kohle (7 %) ergab sich aus der Verwendung

[8] Dies betrifft die Raumkühlung von Wohnbereichen bzw. Arbeitsstätten. Die Kühlung von Lebensmitteln und anderen Gütern fällt unter den Bereich Standmotoren.

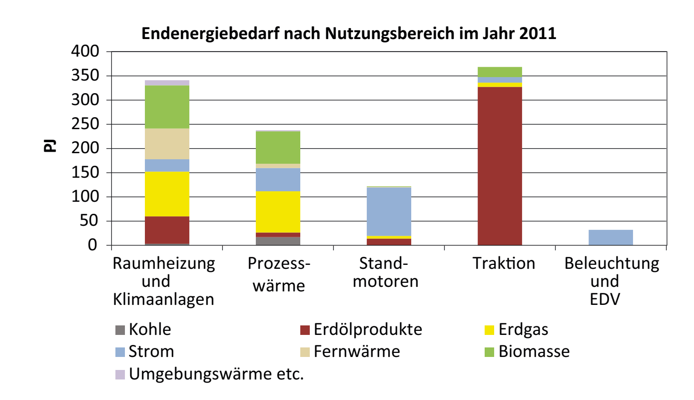


Abbildung 3.8 Endenergiebedarf in Österreich nach Nutzenergiekategorie und Energieträger 2011. Quelle: eigene Darstellung nach Statistik Austria (2013b)

Figure 3.8 Final energy consumption in Austria by end use category and energy carrier 2011. Source: own graph based on Statistik Austria (2013b)

in den Sektoren Eisen- und Stahlerzeugung, bzw. für die Gewinnung von Steinen, Erden und Glas.

Für die Substitution fossiler Energieträger im Bereich der Prozesswärme sind die Möglichkeiten bei Anwendungen, die hohe Temperaturniveaus erfordern, eingeschränkt. So sind etwa Solarthermie, Umgebungswärme und Fernwärme nur für den Einsatz auf niedrigeren Temperaturniveaus geeignet. Mögliche Substitute für Hochtemperaturanwendungen sind feste biogene Brennstoffe bzw. Biogas. Weiters besteht die Möglichkeit einer umfangreichen Nutzung der Abwärme, industrieintern bzw. durch die Einspeisung in ein Wärmenetz.

Standmotoren (122 PJ Endenergiebedarf) wurden zu 82 % über Strom betrieben. Dazu zählen Anwendungen wie Kühlung (inkl. Kühlschränke und Gefriertruhen), Maschinen in Produktionslinien, Pumpen, Maschinen im Baubereich etc. 75 % des Endverbrauchs von Standmotoren entfielen auf den produzierenden Bereich. Haushalte wandten für Kühlen und Gefrieren 7,4 PJ und für Großgeräte (Waschmaschine, Geschirrspüler, etc.) 6,3 PJ auf. Während bei vielen Anwendungen auch Effizienzsteigerungen möglich wären, hängen die Auswirkungen auf den Ausstoß von THG vor allem von dem zur Stromerzeugung verwendet Energieträgermix ab. Der verbleibende Anteil von ca. 12 PJ Erdölprodukten ist zum größten Teil auf den Einsatz von Diesel für Baumaschinen zurück zu führen.

Für Beleuchtung und EDV wurden im Jahr 2011 ca. 32 PJ verwendet, was in etwa 3 % des gesamten Endenergieverbrauchs entspricht. Etwa 20 % entfielen dabei auf den produzierenden Bereich, 42 % auf Dienstleistungen und 36 % auf Haushalte. Der gesamte Bedarf wurde über Elektrizität gedeckt. Ein Umstieg auf alternative Energieträger ist hier na-

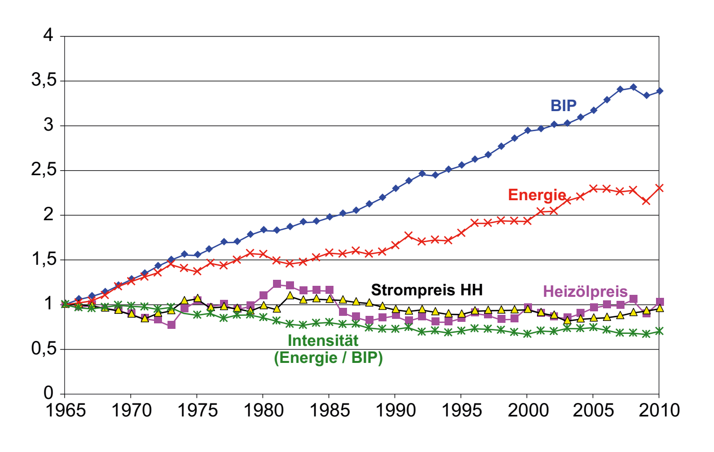


Abbildung 3.9 Entwicklung der Energieintensität in Österreich im Vergleich zu BIP, Endenergie, und Öl- sowie Strompreisen für Haushalte, von 1965 bis 2010. Quelle: eigene Darstellung nach Datenbank Energy Economics Group und Statistik Austria (2013a)

Figure 3.9 Development of energy intensity in Austria in comparison with GDP, final energy consumption and oil as well as electricity prices for households, 1965 to 2010. Source: own graph based on the database of the Energy Economics Group and Statistik Austria (2013a)

türlich weitgehend nicht möglich bzw. sinnvoll, weshalb die Auswirkungen auf den Ausstoß von THG in diesem Anwendungsbereich neben der Effizienz der Geräte nur vom Energieträgermix zur Stromproduktion abhängen.

Energiebedarf und wirtschaftliche Entwicklung

Nachdem das BIP eine Maßzahl für die Produktion innerhalb eines Landes ist und jede Produktion (auch die Bereitstellung von Dienstleistungen) mit einem gewissen Energieaufwand verbunden ist, ist die Entwicklung des Energiebedarfs stark von der Entwicklung der Wirtschaftsleistung abhängig. Dies wird bei der Betrachtung des Einbruchs des BIP im Jahr 2009, der sich auch in einem Rückgang des Primärenergiebedarfs widerspiegelte, ersichtlich.

Aus dieser Sichtweise besteht die einzige Möglichkeit, einen sinkenden Energiebedarf zu erreichen und gleichzeitig positives Wirtschaftswachstum zu generieren, in der Steigerung der Effizienz. Als eine Maßzahl für die Energieeffizienz einer Volkswirtschaft gilt die Energieintensität. Sie ist der Quotient aus Energiebedarf pro Zeiteinheit und Bruttoinlandsprodukt.[9]

Die zeitliche Entwicklung der Energieintensität im Vergleich zu BIP, Endenergie, und Öl- sowie Strompreisen zeigt Abbildung 3.9. Es ist klar zu erkennen, dass seit 1965 das BIP real um mehr als das 3,5-fache gestiegen ist, während Haushaltsstrom- und Benzinpreise als Stellvertreter für die Entwicklung der Energiepreise heute praktisch auf dem gleichen Niveau wie 1965 sind. Aufgrund der gesunkenen Energieintensität ist der gesamte Energieverbrauch nicht so stark gestiegen wie das BIP. Abbildung 3.9 zeigt weiters die Abnahme der Energieintensität von 1965 bis 2010 um ca. 35 %. Mit einem steigenden Anteil erneuerbarer Energieträger und einer zunehmenden Elektrifizierung ist eine Fortführung dieses Trends zu erwarten.

THG-Emissionen im Energiebereich

Die mit der Energieversorgung verbundenen THG-Emissionen in Österreich von 1990 bis 2011 zeigt Abbildung 3.10. Bilanziert sind hier nur direkte Verbrennungsprozesse in Österreich, ohne Berücksichtigung der Vorketten, wie z. B. des Energieaufwands für Gewinnung und Transport von Erdöl oder Biomasse. Die THG-Emissionen der Biomasse werden hier mit null bilanziert. Dies folgt der Argumentation, dass der emittierte Kohlenstoff zuvor während der Wachstumsphase der Atmosphäre entzogen wurde. In den Emissionen der Biomasse sind also nur Methan und Lachgasemissionen in CO_2-Äq. enthalten.

Aus Abbildung 3.10 ist ein Anstieg der Emissionen bis zum Jahr 2005 ersichtlich. Dieser ist vor allem auf einen Anstieg der Verbrennung von Erdölprodukten (Verkehr) und Erdgas zurückzuführen. Seither sanken die Emissionen, hauptsächlich aufgrund von reduzierten Emissionen im Bereich der Erdölprodukte. Hier fällt bei den Haushalten vor allem der Rückgang von Heizöl zur Bereitstellung von Raumwärme ins Gewicht (vgl. Abbildung 3.6).

Die energiebedingten CO_2-Äq. Emissionen in Österreich nach Sektoren sind seit 1990 praktisch nur im Bereich des Verkehrs gestiegen. Bis 2005 gab es einen Anstieg auf fast 25 Mio. t CO_2-Äq., danach sind sie bis 2011 leicht zurückgegangen (vgl. Abbildung 3.10). Im Sektor Haushalte kam es gegenüber 1990 zu einem Rückgang von ca. 20 %, in allen anderen Bereichen waren die Veränderungen von 1990 bis 2011 nur sehr marginal.

[9] Auch die Energieintensität ist natürlich nur bedingt eine Kennzahl für die Effizienz. So kommt es etwa durch eine Auslagerung energieintensiver Prozesse ins Ausland zu einer Senkung der Energieintensität. Diese Verlagerung auf andere Wirtschaftssektoren kann aber nicht direkt als Effizienzgewinn angesehen werden, wenn der gleiche Prozess nur geographisch verlagert wurde und eventuell sogar über weniger effizientere Energieketten produziert wird. So haben dienstleistungsintensive Volkswirtschaften tendenziell geringere Energieintensitäten weil die Wertschöpfung über weniger energieintensive Sektoren erbracht wird. Damit werden aber wiederum energieintensive Produkte aus dem Ausland importiert. Eine andere Möglichkeit den Ressourcenbedarf zu bewerten bieten konsumbasierte Ansätze.

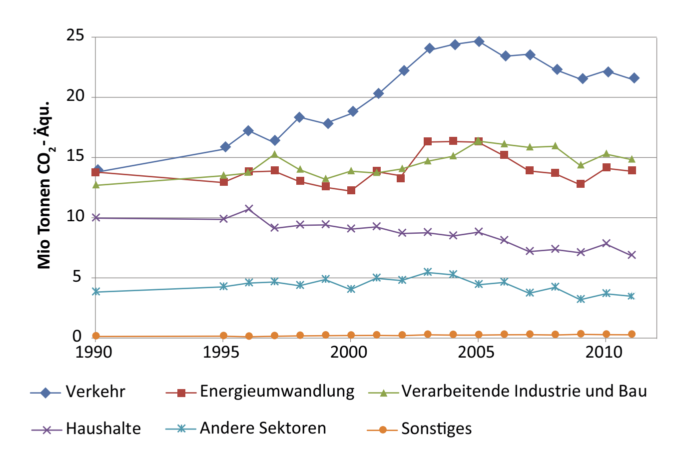


Abbildung 3.10 Energiebezogene THG-Emissionen in Österreich nach Sektoren von 1990 bis 2011 Quelle: Umweltbundesamt (2013)

Figure 3.10 Energy related Greenhouse gas emissions in Austria by sector 1990 till 2011. Source: Umweltbundesamt (2013)

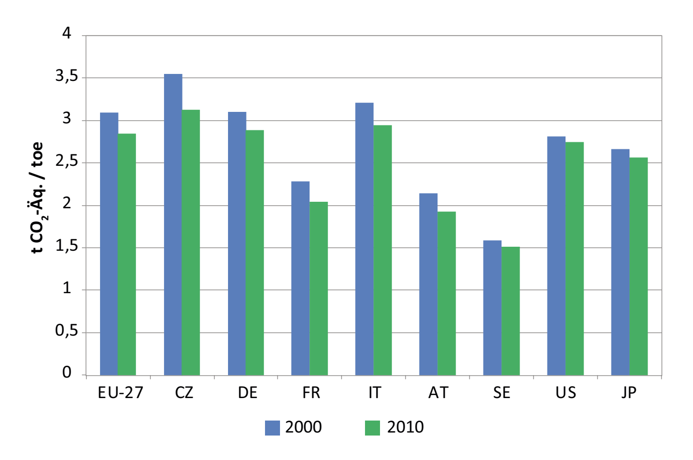


Abbildung 3.11 Spezifische THG-Emissionen in t CO_2-Äq. / toe in ausgewählten Ländern 2000 und 2010. Quelle: EUROSTAT (2013)

Figure 3.11 Specific greenhouse gas emissions in ton CO_2 equivalent per ton oil equivalent in selected countries, 2000 and 2010. Source: EUROSTAT (2013)

Im Jahr 2011 beruhten 52,5 % der energiebezogenen Emissionen auf der Verbrennung von Erdölprodukten, 28,5 % auf Erdgas und ca. 15 % auf Kohle. Der Rest entfiel auf die Verwertung von Abfällen zur Energiegewinnung und auf die Verbrennung von Biomasse.

3.1.3 Indikatoren des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen: Bewertung Österreichs im internationalen Vergleich

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Indikatoren des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen für Österreich im welt- und europaweiten Vergleich dokumentiert und analysiert, um einschätzen zu können wie sich die Situation in Österreich im Vergleich zu anderen Ländern darstellt. Dabei ist vor allem auch die Dynamik der Veränderungen von Interesse. Die wichtigste Literatur zu diesem Abschnitt ist GEA (2012), EUROSTAT (2013) und European Commission (2013).

Die für Österreich relevanten Ziele für die Reduktion der THG-Emissionen werden auf EU-Ebene festgelegt. Darum ist auch für den Energiebereich der Vergleich mit der EU insgesamt sowie mit den anderen EU-Ländern wichtig. In absoluten Werten haben sich EU-weit in den letzten Jahren von den THG-relevanten Energieträgern die absoluten Verbrauchsmengen sowohl bei Kohle als auch bei Erdölprodukten leicht verringert, während der Verbrauch von Erdgas stagnierte.

Vergleich der Primärenergieindikatoren

Zunächst vergleichen wir in Bezug auf die Primärenergieindikatoren die spezifischen THG-Emissionen f_{THG} und den Anteil EET an der Primärenergie.

In Bezug auf die spezifischen THG-Emissionen f_{THG} zeigt Abbildung 3.11, dass Österreich im internationalen Vergleich sehr gut zu bewerten ist. Nur Schweden schneidet in diesem Vergleich besser ab. Auch der Trend ist positiv zu bewerten. Österreich konnte den Wert von 2,13 t CO_2-Äq. / t Öl-Äquivalent (toe) im Jahr 2000 bis zum Jahr 2010 weiter auf 1,93 t reduzieren.

Prozentuell war Österreich in diesem Vergleich gemeinsam mit Frankreich das Land mit den größten Reduktionen (10 % im Vergleich zu 8 % im EU-Durchschnitt).

Der nächste Vergleich bezieht sich auf die Anteile EET. In der derzeitigen Politik der EU spielen erneuerbare Energieträger eine wichtige Rolle. So soll der Anteil an EET am Bruttoendenergieverbrauch[10] in der EU, welcher 2008 bei ca. 12 % lag, laut Grünbuch der EU bis 2020 verdoppelt werden. Die gegenwärtig genutzten ca. 3 800 PJ stellen rund 16 % des möglichen technischen Potentials dar. Die Anteile und Poten-

[10] Der Bruttoendenergieverbrauch umfasst Energieprodukte, die der Industrie, dem Verkehrssektor, Haushalten, dem Dienstleistungssektor einschließlich des Sektors der öffentlichen Dienstleistungen sowie der Land-, Forst- und Fischereiwirtschaft zu energetischen Zwecken geliefert werden, einschließlich des durch die Energiewirtschaft für die Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung entstehenden Elektrizitäts- und Wärmeverbrauchs und einschließlich der bei der Verteilung und Übertragung auftretenden Elektrizitäts- und Wärmeverluste (Richtlinie 2009/28/EG: EU, 2009).

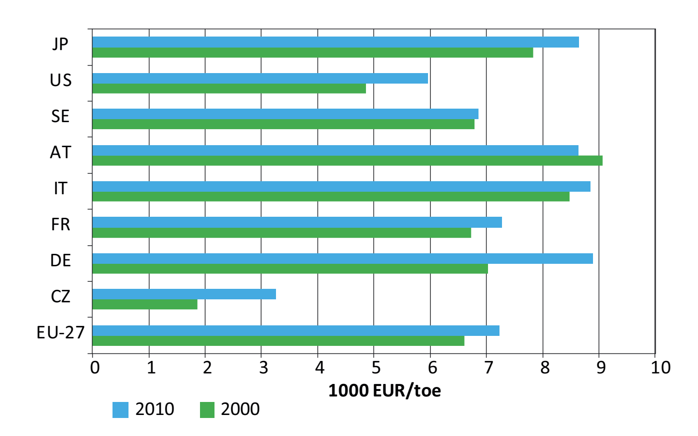


Abbildung 3.12 Serviceintensität in 1 000 €/toe in ausgewählten Ländern 2000 und 2010. Quelle: EUROSTAT (2013)

Figure 3.12 Service intensity in 1 000 €/ton oil equivalent in selected countries 2000 and 2010. Source: EUROSTAT (2013)

tiale sind in den einzelnen Mitgliedsstaaten sehr unterschiedlich. So resultiert der hohe Anteil erneuerbarer Energieträger an der Stromerzeugung in Österreich und Schweden hauptsächlich aus den hohen Wasserkraft- und Biomasseressourcen. Im Vergleich der einzelnen EU-27-Länder in Bezug auf die Anteile EET am Gesamtenergieverbrauch ist Österreich mit einem Anteil von 28 % im Jahr 2008 an vierter Stelle.[11]

Vergleich der Energieintensität und der Serviceeffizienz

Bei einem Vergleich der Energieintensität in den einzelnen EU-27-Ländern liegt Österreich mit einem Wert von ca. 0,0140 toe/1 000 € an vierter Stelle, ist also unter den effizientesten Ländern.

Auch ein Vergleich der Serviceeffizienz – dem Umkehrwert der Energieintensität – bewertet Österreichs Energiesystem im internationalen Vergleich sehr gut (vgl. Abbildung 3.12). Sehr bedenklich ist allerdings der Trend. So war Österreich im Vergleich mit 9080 €/toe im Jahr 2000 unter den verglichenen Ländern an der Spitze, im Jahr 2010 ist es mit 8630 €/toe hinter DEU, ITA und JPN zurückgefallen. In dieser Darstellung war Österreich überhaupt das einzige Land, das sich im Zeitraum 2000 bis 2010 verschlechtert hat.

[11] 2011 betrug der Anteil erneuerbarer Energieträger am Bruttoenergieverbrauch in Österreich 31 % (Quelle: EC, 2012z).

3.1.4 Optionen für den Klimaschutz (zur Verringerung der THG-Emissionen) – Ein Überblick

Das Grundkonzept für den Klimaschutz, das in Abschnitt 3.1.1. dargestellt wurde, besagt, dass es die folgenden drei Ansätze gibt, um die energetischen THG-Emissionen zu verringern:

- Einfluss auf f_{THG}: Bereitstellung des gesamten Energie- und Servicebedarfs mit einem THG-ärmeren Mix an Energieträgern, z. B. durch Umstieg auf erneuerbare Energieträger[12], auf Atomkraft oder durch Carbon Capture and Storage (CCS);
- Einfluss auf η: Effizientere Bereitstellung des gesamten Servicebedarfs, z. B. weniger kWh je m² beheizt bei gleichbleibendem Temperaturniveau in Wohnungen, effizientere Elektrogeräte, geringere Kraftstoffintensität von Fahrzeugen bei gleicher Leistung und Serviceniveau;
- Einfluss auf S: Reduktion des gesamten Servicebedarfs, z. B. weniger m² beheizt, geringere Temperaturen in Wohnung oder Kühlschrank, weniger Elektrogeräte, weniger gefahrene km.

Die möglichen Maßnahmen innerhalb dieser drei Ansätze werden in den folgenden Abschnitten 3.1.5 bis 3.1.7 explizit beschrieben

3.1.5 Optionen für den Klimaschutz I (zur Verringerung der THG-Emissionen) – Beeinflussung des THG-Faktors bei der Energieaufbringung

Der Energiesektor ist aufgrund des hohen Anteils an THG-Emissionen vor allem hinsichtlich notwendiger Klimaschutzmaßnahmen von Relevanz. Gleichzeitig ist der Energiesektor auch vom Klimawandel betroffen. Daher bieten sich einige synergetische Maßnahmen an, die eine gleichzeitige Klimaschutz- und Anpassungswirkung erzielen (z. B. passive Maßnahmen zur Reduktion der Kühllast von Gebäuden, Reduktion innerer Lasten, Photovoltaik als Kapazitätsbeitrag im Sommer). Das Verhältnis von Anpassungs- und Klimaschutzmaßnahmen wurde ausführlich in Band 3, Kapitel 1 dargestellt und wird daher hier nicht mehr weiter diskutiert.

[12] Dieser Energiemix, der Beitrag erneuerbarer Energieträger, wird je nach Anwendung unterschiedlich sein, z. B. Solarthermie und feste Biomasse im Bereich der Wärme. PV, Wasser- und Windkraft zur Stromerzeugung und Biofuels, H_2 oder Strom aus erneuerbaren Energieträgern im Verkehrsbereich.

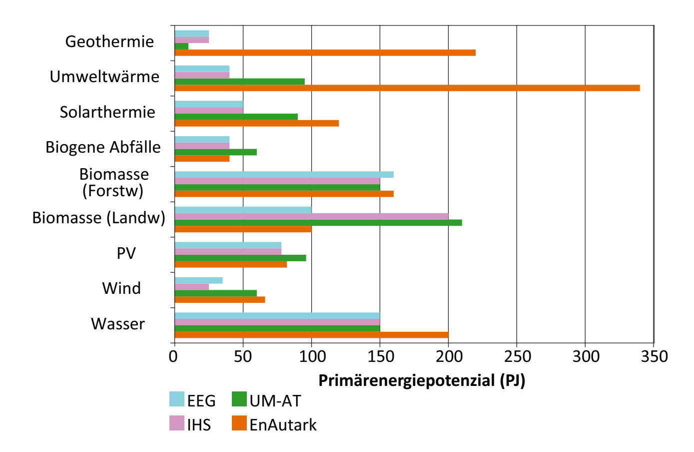


Abbildung 3.13 Erneuerbare Primärenergiepotenziale in Österreich nach Technologie bzw. Energieträger entsprechend verschiedener Studien (bis 2050 erschließbar). Quelle: eigene vergleichende Darstellung

Figure 3.13 Renewable primary energy potentials in Austria by technology and energy carrier from different studies (until 2050 harvestable). Source: own comparative graph

Um die beschriebenen Folgen des Klimawandels abzuschwächen (Mitigation) bzw. Anpassungen (Adaptation) an diese zu treffen, werden im folgenden die wichtigsten Optionen in den einzelnen Abschnitten der Energiekette dargestellt.

Um die THG-Emissionen bei der Energieaufbringung zu reduzieren, also um den Faktor f_{THG} zu verringern, bieten sich grundsätzlich folgende Möglichkeiten an:

- Nutzung erneuerbarer Energiequellen
- Einsatz von Carbon Capture & Storage (CCS)-Technologien
- Nutzung der Atomkraft

Da die beiden letztgenannten Optionen weit entfernt von einer Einsatzmöglichkeit sind, wird im Folgenden nur die Option der Nutzung erneuerbarer Energiequellen diskutiert.

(Dynamische) Potenziale erneuerbarer Energieträger

In diesem Kapitel werden die möglichen gesamten Potenziale erneuerbarer Energieträger zur Wärme-, Strom- und Kraftstoffbereitstellung in einem dynamischen Kontext bis 2050 diskutiert. Dazu werden Analysen verschiedener AutorInnen und Studien verglichen. Einen Überblick dazu geben Abbildung 3.13 und Abbildung 3.14 sowie Tabelle 3.1.

Einige Erklärungen für die Unterschiede: In den EEG-Studien werden bei forstlicher Biomasse keine Ackerflächen genutzt. Das ergibt einen Unterschied von ca. 80 PJ. In Bezug auf den Begriff „Potenzial" gibt es in den verglichenen Studien keinen einheitlichen Begriff. In der Studie „Energie-Autark" (Streicher et al., 2010) wird bei Wasserkraft, Solarthermie, Wind und Geothermie das gesamte technische Potenzial betrachtet. In den meisten anderen Studien werden Potenziale, die unter verschiedenen Fördersystemen bzw. Marktentwicklungen realisiert werden können, beschrieben.

In Bezug auf die absoluten Potenziale EET sind die wesentlichsten Gründe für unterschiedliche Quantitäten in den Szenarien bis 2050 wie folgt: Bei Biomasse ist der zentrale Grund, ob und in welchem Ausmaß auch Biomasse aus landwirtschaftlicher Nutzung berücksichtigt wird. Bei Geothermie sind die Potenziale davon abhängig, wie vor allem die technische Machbarkeit der Tiefengeothermienutzung eingeschätzt wird. In Bezug auf Windkraft bewirken unterschiedliche Ak-

Tabelle 3.1 Gesamte Primärenergiepotenziale erneuerbarer Energieträger in Österreich nach verschiedenen Studien (in PJ) bis 2050

Table 3.1 otal primary energy potentials of renewables in Austria (in PJ) due to different studies up to 2050

	EnAutark (Streicher et al., 2010)	Christian	IHS (Bliem et al., 2011)	EEG (verschiedene Studien)
Wasser	200	150	150	150
Wind	66	60	25	25
PV	82	96	78	78
Biomasse (Landwirtschaft)	100	210	200	100
Biomasse (Forstwirtschaft)	160	150	150	160
Biogene Abfälle	40	60	40	40
Solarthermie	120	90	50	50
Umweltwärme	340	95	40	40
Geothermie	220	10	25	25

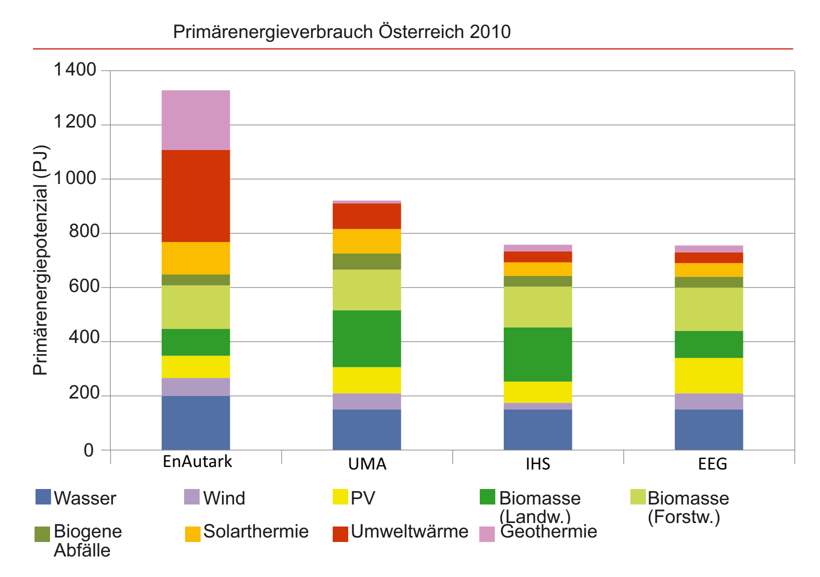


Abbildung 3.14 Primärenergiepotenziale für Österreich nach Technologie bzw. Energieträger aggregiert nach verschiedenen Studien. Quelle: eigene vergleichende Darstellung

Figure 3.14 Primary energy potentials in Austria by technology and energy carrier aggregated from different studies. Source: own comparative graph

zeptanzniveaus für die Errichtung von Windenergieanlagen die wichtigsten Unterschiede in den Potenzialen. Ein zentraler Unterschied bei den Potenzialen der PV ist der Zugang in der Modellierung. In den meisten Studien wird eine grobe Top-Down-Abschätzung mit unterschiedlichen Annahmen in Bezug auf die verfügbaren Flächen durchgeführt und das Ergebnis sind entsprechend unterschiedliche Potenziale. Es gibt nur wenige Ansätze in Österreich, welche die Marktdurchdringung der PV in einem systematischen Kontext setzt, der die Systemintegration berücksichtigt, diese sind in der wissenschaftlich begutachteten („peer-reviewed") Literatur (noch) nicht dokumentiert.

In Bezug auf die Nutzung EET liegt das minimale Potenzial basierend auf allen verfügbaren erneuerbaren Energieträgern in Österreich bis 2050 bei ca. 750 PJ. Das entspricht in etwa 65 % des österreichischen Endenergieverbrauchs des Jahres 2011, wobei vor allem Biomasse, Wind und Photovoltaik einen deutlich größeren Beitrag als heute liefern können. Das maximale Potenzial, das vor allem auf der Nutzung deutlich größerer Mengen von Umweltwärme und Geothermie beruht, liegt bei ca. 1 300 PJ.

Energetische Biomassenutzung in Österreich: Potenziale und Szenarien

Biomasse nimmt mit einem Anteil von 16 % am Primärenergieverbrauch (2011) eine wichtige Stellung in der österreichischen Energieversorgung ein (Statistik Austria, 2012). Der Großteil davon geht auf Holz. B.rennstoffe zurück (über 80 %). Diese werden entweder direkt, in Form von Brennholz oder Waldhackgut, oder indirekt, d. h. als Sägenebenprodukte (SNP: Sägespäne, Hackgut etc.), Ablauge der Papierindustrie oder Altholz, einer energetischen Nutzung zugeführt. Der übrige Biomasseeinsatz setzt sich aus flüssigen und gasförmigen Energieträgern (in erster Linie landwirtschaftlicher Herkunft), sowie sonstigen biogenen Abfällen zusammen.

Biomasse weist aufgrund der Einsetz. B.arkeit in allen drei oben behandelten Sektoren (Strom, Wärme, Verkehr) eine hohe Flexibilität und Sektor-übergreifende Relevanz auf. Um diesen Aspekten Rechnung zu tragen ist der Biomasse hier ein gesonderter Abschnitt gewidmet.

Bei einem Vergleich von Literaturdaten zu Potenzialen erneuerbarer Energieträger muss zunächst zwischen den verschiedenen Arten von Potenzialen, wie „theoretischen", „technischen", oder „wirtschaftlichen" Potenzialen unterschieden werden (siehe z. B. Rettenmaier et al., 2010; Hoefnagels et al., 2011). Für das theoretische Biomassepotenzial sind ausschließlich die physikalisch-biologischen Restriktionen maßgeblich. So erfolgt in Kaltschmitt und Streicher (2009) eine Abschätzung auf Basis der gesamten Landfläche Österreichs (abzüglich Gewässer, Ödland etc.; ca. 68 000 km^2), eines unterstellten durchschnittlichen Trockenmasseertrags von 20 t / ha und der Annahme, dass der gesamte jährliche Zuwachs energetisch genutzt wird, ergibt ein theoretisches Potenzial von 136 Mio. t / Jahr bzw. 2,7 EJ / Jahr. Dieser Wert hat jedoch ausschließlich illustrativen Charakter und keinerlei Aussagekraft hinsichtlich der realistisch energetisch nutz. B. aren Biomasse.

Aussagekräftiger ist das technische Potenzial, das jene Energiemenge darstellt, die unter den jeweiligen technischen Möglichkeiten erschlossen werden kann. In der Definition nach Rettenmaier et al. (2010) sind darüber hinaus folgen-

de Restriktionen maßgeblich: Einschränkungen hinsichtlich der Flächenverfügbarkeit (insbesondere in Anbetracht konkurrierender Flächennutzung für Nahrungsmittel- und Futterproduktion), stoffliche Biomassenutzung (insbesondere im Bereich der Holznutzung), ökologische Restriktionen sowie diverse andere nicht-technische Einschränkungen.

Wird ausschließlich das unter konkreten ökonomischen Rahmenbedingungen nutz. B.are Potenzial betrachtet, spricht man vom wirtschaftlichen Potenzial. Durch Berücksichtigung weiterer Einschränkungen institutioneller, politischer bzw. ökologischer Natur gelangt man zu realisierbaren bzw. nachhaltig realisierbaren Potenzialen (Definition nach: Rettenmaier et al., 2010).

Die Berücksichtigung von konkurrierenden Nutzungsmöglichkeiten erfolgt im Rahmen von Potenzialanalysen in der Regel durch Szenarien. So werden beispielsweise Annahmen hinsichtlich der zukünftigen Gesamtproduktion an SNP und eines für energetische Nutzung zur Verfügung stehenden Anteils, oder hinsichtlich eines Flächenbedarfes für Nahrungs- und Futtermittelproduktion getroffen. Insbesondere bei Potenzialabschätzungen mit längerfristigem Betrachtungszeitraum ist die Ausgestaltung solcher Szenarioannahmen von zentraler Bedeutung. Als überaus unsichere Einflussfaktoren, die jedoch einen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse haben, sind Ertragsentwicklungen bzw. Züchtungsfortschritte bei Ackerfrüchten, Auswirkungen des Klimawandels (insbesondere auch hinsichtlich der Häufigkeit von Extremereignissen wie Dürren und Stürmen), technologische Entwicklungen und allgemeine gesellschaftliche Trends wie die Bevölkerungsentwicklung oder Ernährungsgewohnheiten zu nennen. Darüber hinaus beeinträchtigen zum Teil unsichere bzw. unzureichende statistischen Daten die Qualität und Aussagekraft von Potenzialabschätzungen. All diese Unsicherheiten spiegeln sich in den Bandbreiten der Literaturangaben zu technischen Biomassepotenzialen in Österreich wider.

Angaben zum technischen Biomassepotenzial in Österreich liegen in einer Größenordnung von 230 bis 400 PJ, vgl. Abbildung 3.14 und damit bei ca. 100 bis 150 % der primärenergetischen Biomassenutzung im Jahr 2011. Eine der in Zusammenhang mit Biomassepotenzialen in Europa meistzitierten Studien ist EEA (2006). Für Österreich wird darin für 2010 ein umweltverträgliches Biomassepotenzial in der Höhe von ca. 290 PJ ausgewiesen. Etwa 48 % davon gehen auf forstliche Biomasse und SNP zurück, weitere 43 % auf Abfälle und Reststoffe und der Rest auf Energiepflanzen. Für letztere wird ein (Acker-) Flächenpotenzial in der Höhe von ca. 200 000 ha (knapp 15 % der gesamten Ackerfläche Österreichs) angegeben. Bis zum Jahr 2030 kommt es nach EEA (2006) zu einer Steigerung des Flächenpotenzials um fast 50 % und des gesamten Biomassepotenzials auf ca. 360 PJ.

Ebenfalls in einem dynamischen Kontext wird das Biomassepotenzial in Kranzl et al. (2008) untersucht, wobei durch Variation unsicherer Einflussfaktoren Bandbreiten abgeleitet werden. Zu diesen Einflussparametern zählen die Entwicklung der Holz verarbeitenden Industrie, der Energiepflanzenmix auf Ackerflächen sowie der energetisch nutz. B. are Anteil diverser Reststoffe und Nebenprodukte wie Stroh, Altholz oder Pflanzenreste. Für das Jahr 2010 ergibt sich eine Bandbreite des nachhaltig nutz. B.aren technischen Potenzials von ca. 250 bis 285 PJ. Bis 2030 kommt es zu einer Steigerung auf ca. 320 bis 390 PJ, und bis 2050 zu einer weiteren Steigerung um ca. 40 bis 55 PJ. Hinsichtlich der Ackerflächenpotenziale wurde in Kranzl et al. (2008) auf die Ergebnisse aus EEA (2006) zurückgegriffen.

Zu einer noch stärkeren Diskrepanz zwischen kurz- und langfristigen Biomassepotenzialen kommen Ericsson und Nielsson (2006): Als kurzfristiges Potenzial (kurzfristig wird hier definiert als Zeitraum von 10 bis 20 Jahren) weisen sie einen Wert von ca. 120 PJ aus, wobei Abfälle und Reststoffe mit Ausnahme von SNP und Pflanzenresten aus der Landwirtschaft nicht berücksichtigt sind. Demgegenüber steht ein langfristiges Potenzial (Zeitraum über 40 Jahre) von bis zu ca. 380 PJ. Trotz der Tatsache, dass in Ericsson und Nielsson (2006) nicht alle Biomassefraktionen berücksichtigt sind, zählt diese Potenzialangabe zu den höchsten in der Literatur.

Die in Publikationen der IEE-Projekte EUBIONET II und III für Österreich ausgewiesenen „verfügbaren Ressourcen“ befinden sich im unteren Bereich der oben genannten. Potenziale: In Alakangas et al. (2007) werden sie mit ca. 230 PJ beziffert, und in Junginger et al. (2010) auf ca. 300 PJ nach oben revidiert. In einer europaweiten Studie mit dem Bezugsjahr 2000 (Nikolaou et al., 2003) wurde das verfügbare Potenzial mit ca. 260 PJ ermittelt. Vesterinen und Alkangas. (2001) beziffern die in Österreich verfügbaren Ressourcen mit 270 PJ. Streicher et al. (2010) gehen in der Studie „Energieautarkie für Österreich 2050“ von einem Biomassepotenzial von knapp über 300 PJ aus. Auf einen ähnlichen Wert, nämlich 304 PJ, kommen Rathbauer (2000), bzw. Wörgetter et al. (2001). In einer Publikation des Österreichischen Biomasseverbandes (Jauschnegg und Pfemeter, 2011) wird das Potenzial im Jahr 2020 mit 274 PJ beziffert.

Aus den analysierten Potenzialstudien lassen sich folgende Schlussfolgerungen ableiten: Eine weitere Steigerung der Nutzung inländischer Biomasse ist möglich, insbesondere hinsichtlich der längerfristigen Möglichkeiten divergieren die

Aussagen jedoch. Grund dafür ist einerseits die Vielzahl an unsicheren bzw. kaum prognostizierbaren Einflussfaktoren (wie zukünftige Ertragsentwicklungen, tatsächlich mobilisierbare Potenziale diverser biogener Reststoffe etc.) und andererseits die Abhängigkeit der Biomassepotenziale von generellen Wirtschaftsentwicklungen bzw. Entwicklungen in Sektoren wie der Holz verarbeitenden Industrie, gesellschaftlichen Trends u.v.m. Die längerfristig bedeutendsten, derzeit noch nicht erschlossenen Potenziale werden von zahlreichen Studien bei Energiepflanzen gesehen. Aber auch für landwirtschaftliche und industrielle Abfälle und Reststoffe biogener Herkunft werden zum Teil bedeutende Potenziale ausgewiesen. Die Potenziale forstlicher Biomasse in Österreich müssen aufgrund der starken Ausweitung der Holznutzung in den letzten Jahren als weitgehend erschlossen betrachtet werden. Ungenutzter Waldzuwachs ist laut Waldinventur 2007 / 09 (BFW, 2011) nur mehr im Kleinwald vorhanden und beläuft sich auf 15 % des jährlichen Gesamtzuwachses.

Eine Reihe von Szenarien zur zukünftigen Entwicklung der Biomassenutzung zeigt, dass in den nächsten Jahren und Jahrzehnten auch im Kontext von steigender Energieeffizienz im Gebäudebereich eine weitere Steigerung des Biomasse-Primärenergieeinsatzes als möglich bzw. wahrscheinlich erachtet wird. In einer Vorstudie für einen nationalen Biomasseaktionsplan (Indinger et al., 2006) wird bis 2020 ein Anstieg auf über 250 PJ prognostiziert. Etwas größer ist die Bedeutung von Biomasse zur Erreichung der 2020-Ziele in einem „Balanced Policy Szenario" nach Resch et al. (2008): Hier steigt der Biomasse-Primärenergieeinsatz auf ca. 280 PJ. Auf eine ähnliche Größenordnung steigt der Biomasseeinsatz in den Syntheseszenarien des Umweltbundesamtes (Krutzler et al., 2009): Inklusive nicht biogener Abfälle wird für das Jahr 2020 ein Wert von 312 PJ ausgewiesen. Unter der Annahme, dass das Aufkommen nicht biogener Abfälle gegenüber dem derzeitigen Niveau (2011: ca. 35 PJ) etwa konstant bleibt, ergibt sich ein Biomassebedarf in der Größenordnung von 275 bis 280 PJ. Dem gegenüber stehen die Szenarien der „Energiestrategie Österreich" (BMWFJ / BMLFUW, 2010) bzw. des „Nationalen Aktionsplans für erneuerbare Energie" (BMWFJ, 2010), in denen der absolute Beitrag von Bioenergie in allen Sektoren von 2010 bis 2020 nur minimal zunimmt.

Bei allen Szenarien der Biomassenutzung bis 2020, bleibt die primärenergetische Biomassenutzung also deutlich unter 300 PJ. Auch in den im Rahmen dieses Assessments zur Verfügung stehenden längerfristigen Literaturszenarien zur Nutzung inländischer Biomasseressourcen bleibt der Primärenergieeinsatz unter 300 PJ. In den „Policy-Szenarien" nach Kalt et al. (2010a) werden im Jahr 2030 zwischen 194 und 250 PJ an Biomasse inländischer Herkunft genutzt. Die zur Erreichung der Energieautarkie im Jahr 2050 benötigte Menge an Biomasse beläuft sich laut Streicher et al. (2010) in einem „Konstantszenario" auf 244 PJ, in einem Wachstumsszenario auf 293 PJ. In den „Policy-Szenarien" nach Kranzl et al. (2008) bzw. Kalt et al. (2010b) steigt der Primärenergieeinsatz inländischer Biomasse bis 2020 auf bis zu 225 PJ, und bis 2050 auf bis zu 290 PJ. Einem höheren Biomasseeinsatz stehen einerseits hohe Bereitstellungskosten der Restpotenziale, und andererseits nachfrageseitige Restriktionen hinsichtlich der ökonomisch sinnvollen Einsatzmöglichkeiten von Biomasse entgegen.

Wasserkraft

Die Wasserkraft deckt in Österreich derzeit – je nach Jahr und Verfügbarkeit – ca. 55–60 % des Bedarfs an elektrischer Energie (E-Control, 2013). Sie wird als nahezu CO_2-neutral eingestuft und liefert einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung von Klimaschutzzielen (z. B. Kyoto-Protokoll), zur Versorgungssicherheit und zu einem nachhaltigen Energiesystem. Wasserkraft wird als historisch gewachsener und technisch weit entwickelter EET angesehen. In Österreich waren bereits vor etwa zehn Jahren knapp 70 % des gesamten verfügbaren Wasserkraftpotenzials von insgesamt 56 TWh / Jahr ausgebaut (Pöyry Energie GmbH, 2008; Jungwirth et al., 2003). Von den verbleibenden 18 TWh / Jahr liegen etwa 5 TWh / Jahr in hochsensiblen Regionen (z. B. Nationalparks, UNESCO-Weltkulturerbe) und können daher energiewirtschaftlich nicht genutzt werden. Es ergibt sich ein reduziertes technisch-wirtschaftliches Restpotenzial von 12,8 TWh / Jahr. Eine österreichweite Betrachtung zeigt jedoch unterschiedliche Potenziale in den Bundesländern. Während im Westen Österreichs noch beträchtliche Potenziale vorhanden sind, ist das Wasserkraftpotenzial in Ober- und Niederösterreich weitgehend ausgeschöpft (Pöyry Energie GmbH, 2008).

Nach aktuellen Erhebungen existieren derzeit 5 240 Wasserkraftwerke in Österreich (Habersack et al., 2012; Wagner et al., 2014), Mit einer Bruttostromerzeugung von 41,6 TWh im Jahr 2010 (E-Control, 2011). Abzüglich der einspeisenden Kraftwerke ergeben sich 2 621 Eigenbedarfsanlagen, die somit etwa die Hälfte der österreichischen Wasserkraftwerksanlagen ausmachen. Anzumerken ist, dass insbesondere die Anzahl der Kleinwasserkraftwerke (≤ 10 MW Engpassleistung) nicht zu vernachlässigenden Schwankungen von ca. 2,5 % in 7 Monaten unterliegten (Habersack et al., 2012). Bei ausschließlicher Betrachtung der einspeisenden Wasserkraftwerke zeigt sich, dass ca. 88 % des gesamten Regelarbeitsvermögens (d. h. der

bei durchschnittlicher Wasserführung erzeugten Strommenge) auf Großwasserkraftwerke entfallen und diese zahlenmäßig nur 6 % aller Wasserkraftwerke in Österreich ausmachen.

Zukünftige Entwicklungen der Wasserkraft in Österreich und ihr Beitrag zur Erreichung von Klimaschutzzielen (z. B. Reduktion von TreibhausgasenTHG) sind stark von gesetzlichen Rahmenbedingungen und Aktivitäten der Elektrizitätswirtschaft abhängig. Derzeit ist die Rolle der Wasserkraft in Österreich von einer zunehmend politischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Diskussion geprägt. Auf gesetzlicher Ebene wurden durch das Inkrafttreten relevanter europäischer Richtlinien und deren Umsetzung auf nationaler Ebene Rahmenbedingungen geschaffen, die zukünftige Maßnahmen in den Bereichen Energie-, Umwelt- und Klimapolitik entscheidend beeinflussen (Habersack et al., 2012). Gemäß der Erneuerbare-Energien-Richtlinie (EU, 2009) soll in der EU bis zum Jahr 2020 der Anteil erneuerbarer Energien am Energieverbrauch auf 20 % steigen.

Im Regierungsprogramm der Bundesregierung für die XXVI. Gesetzgebungsperiode ist war das Ziel verankert, das Wasserkraftpotenzial künftig noch stärker nutz. B.ar zu machen (Österreichische Bundesregierung, 2008). Die Länder wurden angehalten, Kriterienkataloge zum nachhaltigen Ausbau der Wasserkraft zu erstellen (z. B. Tiroler Landesregierung, 2011) und ein bundesweiter Kriterienkatalog (BMLFUW, 2011) soll zur Transparenz bei der Beurteilung neuer Kraftwerksprojekte beitragen. Die Energiestrategie Österreich sieht durch gegebene energiewirtschaftliche Rahmenbedingungen und Anreize im Ökostromgesetz eine Ausbaugröße der Klein-, Mittel- und Großwasserkraftwerke von 3,5 TWh / Jahr (12,6 PJ / Jahr) bis 2015 vor. Davon können 0,7 TWh / Jahr durch Effizienzsteigerungen und Revitalisierungen bestehender Standorte nach modernen Standards erreicht werden. Somit wird eine realistische Ausbaugröße von mindestens 2,8 TWh / Jahr angenommen (BMWFJ und BMLFUW, 2010). Von Seiten der Elektrizitätswirtschaft wurde ein Aktionsplan präsentiert, der aktuelle Kraftwerksprojekte darstellt und ein Ausbauziel von 7 TWh / Jahr bis 2020 verfolgt (Oesterreichs Energie, 2012). Fast zeitgleich mit der Energiestrategie Österreich wurde der Nationale Gewässerbewirtschaftungsplan (NGP) im Rahmen der Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL, (2000/60/EG: EU, 2000) veröffentlicht (BMLFUW, 2010). Ein weiterer Ausbau der Wasserkraft könnte ökologische und flussmorphologische Auswirkungen, wie zum Beispiel eine Beeinträchtigung der Gewässerstrukturen und der Habitatqualität oder einen negativen Einfluss auf die Fischpassierbarkeit und Feststoffdurchgängigkeit haben. Dies würde jedoch im Widerspruch zu den Vorgaben der EU-WRRL (Verschlechterungsverbot bzw. Verbesserungsgebot) und des Nationalen Gewässerbewirtschaftungsplans stehen (Habersack et al., 2012).

Damit die Wasserkraft auch in Zukunft im Hinblick auf THG-Mitigation einen wesentlichen Beitrag leisten kann und gleichzeitig energiewirtschaftliche, ökologische und gesellschaftliche Zielsetzungen erfüllt werden können, ist eine integrative, österreichweite Strategie erforderlich (Habersack et al., 2011).

Strategien zur Forcierung EET

In Bezug auf die Nutzung EET liegt das auf allen verfügbaren erneuerbaren Energieträgern basierende Potenzial in Österreich bis 2050 bei ca. 170 TWh bzw. 610 PJ. Das entspricht in etwa 56 % des österreichischen Endenergieverbrauchs des Jahres 2011, wobei vor allem Biomasse, Wind und Photovoltaik einen deutlich größeren Beitrag als heute liefern können.

Die wichtigsten Maßnahmen, um das Potenzial EET in Österreich bis 2050 optimal zu erschließen, sind:

1. Einführung einer CO_2-basierten Steuer: Diese Maßnahme stellt sicher, dass die Markteinführung zusätzlicher EET in Abhängigkeit von deren ökologischer Performance stattfindet
2. Eine rigorose Verschärfung der Standards bezüglich der CO_2 Emissionen der verschiedenen EET
3. Ein fokussiertes Forschungs- und Entwicklungsprogramm für „2nd generation biofuels" und für Brennstoffzellen mit begleitender energetischer und ökologischer Evaluierung.
4. Finanzielle Förderung für EET, solange es keine Steuern gibt, die alle Externalitäten berücksichtigen. Diese Förderung ist in einem dynamischen Kontext anzupassen, wobei Technologisches Lernen und CO_2-Bilanzen (z. B. bei Biofuels) zu berücksichtigen sind (Haas et al., 2011).
5. Zur Realisierung verbleibender Potentiale bei Wasserkraft und Wind ist eine integrative Österreichweite Strategie erforderlich.

Nur wenn dieser Mix von Maßnahmen sorgfältig aufeinander abgestimmte eingeführt wird, ist es möglich, das Potenzial EET in Österreich bis 2050 aus gesellschaftlicher Sicht optimal zu erschließen.

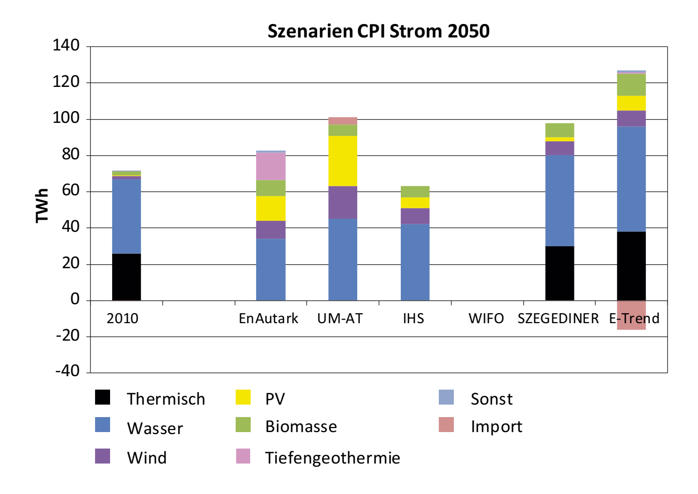


Abbildung 3.15 Entwicklung der Stromaufbringung bis 2050 im Vergleich zu 2010 in verschiedenen Studien in CPI-Szenarien. Quelle: eigene vergleichende Darstellung

Figure 3.15 Development of electricity supply in different studies until 2050 in comparison to 2010 in Current Policy Initiatives (CPI) scenarios. Source: own comparative graph

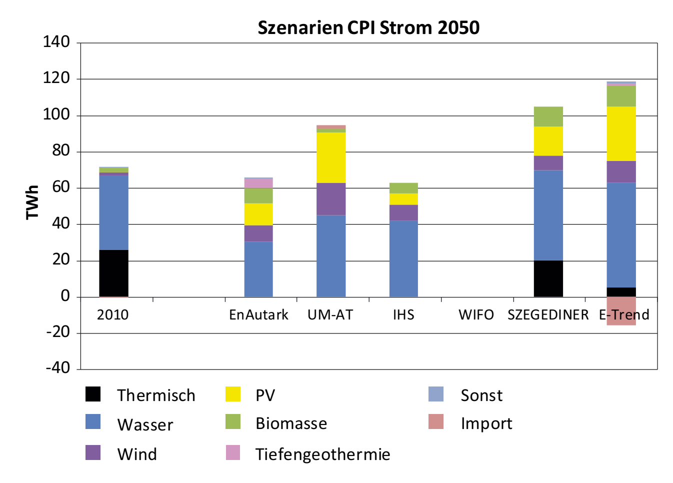


Abbildung 3.16 Entwicklung der Stromaufbringung bis 2050 im Vergleich zu 2010 in verschiedenen Studien in NPI-Szenarien. Quelle: eigene vergleichende Darstellung

Figure 3.16 Development of electricity supply in different studies until 2050 in comparison to 2010 in New Policy Initiatives (NPI) scenarios. Source: own comparative graph

3.1.6 Optionen für den Klimaschutz II – Perspektiven für technische Effizienzsteigerungen bei der Energieumwandlung

Dieser Abschnitt analysiert die möglichen Potenziale und Kosten sowie die Perspektiven für technische Effizienzsteigerungen konventioneller Technologien im Bereich der Aufbringung, der Umwandlung in Strom sowie für die Nutzenergiekategorien Raumwärme, Kühlung und WW und stromspezifische Anwendungen.

Diejenige Energie, die den VerbraucherInnen nach der letzten technischen Umwandlung zur Verfügung steht, ist die Nutzenergie. Diese letzte Umwandlung bei den VerbraucherInnen ist von beträchtlichen Verlusten gekennzeichnet. So betrug der Endenergieverbrauch im Jahr 2008 952 PJ, während als Nutzenergie den VerbraucherInnen nur 580 PJ zur Verfügung standen. Diese Verluste sind jedoch von Verwendungszweck zu Verwendungszweck unterschiedlich. Der Verwendungszweck mit den (prozentuell) größten Endenergieverlusten ist der Bereich EDV und Beleuchtung. Hier betrugen die Endenergieverluste ca. 95 %. Auch im Bereich Mobilität betrugen die Endenergieverluste mehr als 67 %. Die geringsten Endenergieverluste fielen in den Bereichen mechanische Arbeit (ca. 23 %), Prozesswärme (24,7 %) sowie Raumheizung und Warmwasser (28,4 %) an.

Stromaufbringung, nach Energieträgern zur Erzeugung Stromerzeugung

Im Folgenden wird die Zukunft der Erzeugung elektrischer Energie diskutiert, wobei der Energieträgermix bzw. die absoluten Anteile einzelner Energieträger im Fokus stehen. Die in der Literatur ersichtliche künftige Entwicklung der heimischen Stromaufbringung bei Fortführung bestehender Politiken (CPI-Szenarien) zeigt Abbildung 3.15, im Detail wird hierbei ein Vergleich des gemäß betrachteter Studien erwarteten Energieträgermixes 2050 mit heute (2010) dargestellt. Es lassen sich zweierlei Effekte erkennen: Analog zur Nachfrageseite wird eine breite Palette möglicher Entwicklungen skizziert, so resultiert für 2050 eine große Bandbreite mit Werten zwischen 63 und 127 TWh. Des Weiteren weisen die Studien einen sehr unterschiedlichen Energieträgermix aus. Der Einsatz fossiler Energieträger liegt demnach in der Größenordnung zwischen 0 und ca. 35 TWh und, schenkt man den Studien Glauben, so kann ohne Berücksichtigung der Wasserkraft der künftige Anteil erneuerbarer Energieträger im Bereich zwischen 20 bis 50 TWh liegen. Lediglich für den Beitrag der Wasserkraft im Jahr 2050 zeigt sich mit Werten zwischen 40 und 55 TWh ein relativ harmonisches Bild.

Der erwartete Einfluss neu zu implementierender energiepolitischer Maßnahmen auf die Aufbringungsseite wird nachfolgend veranschaulicht: Abbildung 3.16 zeigt einen Vergleich der künftigen Stromaufbringung im Jahr 2050 sowie den Status Quo (2010) gemäß verschiedener Studien für

NPI-Szenarien, also bei Einführung alternativer energiepolitischer Lenkungsmaßnahmen. Analog zu zuvor zeigen sich auch hier zweierlei Effekte: Einerseits lässt sich eine große Bandbreite bei der erwarteten Erzeugung für 2050 erkennen. Es wird je nach Studie eine heimische Stromerzeugung von 63 bis 119 TWh ausgewiesen, welche den Bandbreiten der CPI-Szenarien stark ähnelt. Weiters wird ein sehr unterschiedlicher Energieträgermix ausgewiesen, bei dem die fossilen Energieträger zwischen 0 und ca. 20 TWh liegen und der Anteil erneuerbarer Energieträger ohne Wasserkraft im Bereich zwischen 20 und 60 TWh liegt. Der Beitrag der Wasserkraft ist mit Werten zwischen 40 und 55 TWh gleich wie in den CPI-Szenarien. Lediglich die Stromerzeugung aus PV wird für das Jahr 2050 in den Szenarien sehr unterschiedlich prognostiziert.

In einigen laufenden und abgeschlossenen Arbeiten wird bzw. wurde auch der Einfluss des Klimawandels auf die Stromproduktion, sowohl aus thermischen Kraftwerken als auch aus Wasserkraftwerken analysiert (vgl. z. B. Felberbauer et al. (2010), Kranzl et al. (2010), sowie die laufenden ACRP-Projekte EL.ADAPT, PRESENCE). Thermische Kraftwerke sind aufgrund höherer Temperaturen durchaus vom Klimawandel betroffen. In Österreich können diese im Wesentlichen allerdings durch Ansaugluftkühler in der Gasturbine bzw. Ablaufkühltürmen für Kühlwässer aus dem Kondensator deutlich reduziert werden. Die Wasserkraftproduktion ist durch eine Abnahme des Abflusses beeinträchtigt. In Kranzl et al. (2010) wird dieser Abnahme-Effekt bis zur Mitte des Jahrhunderts mit ca. 1–5 TWh (elektrisch) gegenüber dem nicht klimasensitiven Fall bewertet. Darüber hinaus weisen alle Studien eine gewisse saisonale Verschiebung (d. h. höhere Abflüsse im Winter, geringere im Sommer) aus.

Der Einsatz erneuerbarer Energieträger bei der Stromaufbringung

Im Bereich der Stromerzeugung liegen die wichtigsten Potenziale bis 2050 bei folgenden Technologien bzw. Energieträgern:

- Wasserkraft
- Wind
- Photovoltaik (PV)
- Tiefen-Geothermie
- Biomasse-Verstromung, vor allem bei Nutzung in Anlagen auf Basis von Kraft-Wärme Kopplung (KWK)
- Strom der Biogasnutzung aus KWK

Alle aufgelisteten Energieträger sind als erneuerbar zu klassifizieren. Die Vorrangstellung EET in Österreich zeigte sich bereits im vorigen Abschnitt und soll nachfolgend eingehender betrachtet werden. Im Gegensatz zu den Wärmeszenarien sind hier die Prioritäten für Technologien sehr ähnlich und die Bandbreiten viel geringer. Lediglich der hohe Anteil an Tiefengeothermie in den EnergieAutark-Szenarien (Streicher et al., 2010) erscheint außergewöhnlich. Generell weisen die betrachteten Studien einen unterschiedlichen Mix an EET aus, dennoch erweisen sich Photovoltaik, Wind und Biomasse als Schlüsseloptionen, was den künftigen Ausbau betrifft. Die Vorrangstellung der Wasserkraft bleibt wohl auch bis 2050 erhalten, jedoch ist hier nur von einer vergleichsweise geringfügigeren Ausweitung der Produktionskapazitäten auszugehen. Nebst der zuvor erwähnten Tiefen-Geothermie zeigen sich Unterschiede bei den untersuchten Studien insbesondere bei der Photovoltaik, dennoch kann diese Form der Stromerzeugung wohl als wesentliche Zukunftsoption für Österreich angesehen werden.

Folgender Effekt ist im Vergleich zwischen den CPI und NPI-Szenarien des Weiteren hervorzuheben: In der Studie „EnAutark“ (Streicher et al., 2010) ist die Stromproduktion aus EET im NPI-Szenario geringer als im CPI-Szenario. Im Gegensatz hierzu weisen die Studien Re-Shaping (vgl. Ragwitz et al., 2012) und E-Trend einen gegenläufigen Trend aus – hier ist von einer verstärkten Stromproduktion aus erneuerbaren Energieträgern bei Einführung alternativer (zusätzlicher) energiepolitischer Maßnahmen auszugehen. Ein Szenarienmerkmal, das die wohl übliche Erwartungshaltung gut widerspiegelt. Der Grund für die konzeptionelle Abweichung ist, dass bei Streicher et al. (2010) bereits im CPI-Szenario 100 % des Stroms aus EET erzeugt wird, im NPI-Szenario darüber hinaus weniger Strom verbraucht wird.

In Bezug auf die Infrastruktur sind die deutlichsten Veränderungen im Strombereich notwendig, wobei hierbei nahezu alle Subbereiche (Erzeugung, Netz, Speicherung und Verbrauch) betroffen sind. Der steigende Anteil EET im Erzeugungsbereich, Smart Grids vor allem auf Verteilnetzebene, neue Stromspeichertechnologien und -kapazitäten sowie Smart Meters bei den Verbrauchern werden die bestehenden Strukturen signifikant verändern und eine weitgehend THG-arme Stromversorgung ermöglichen.

Die bedeutendste Veränderung, die im Bereich der Stromversorgung derzeit stattfindet, ist der Markteintritt der Photovoltaik in Deutschland. Diese wird in den nächsten Jahren das gesamte Marktsystem – auch in Österreich – fundamental verändern, da temporär sehr große Strommengen aus diesen Anlagen produziert werden, die Eigenverbrauchsanteile erhöht

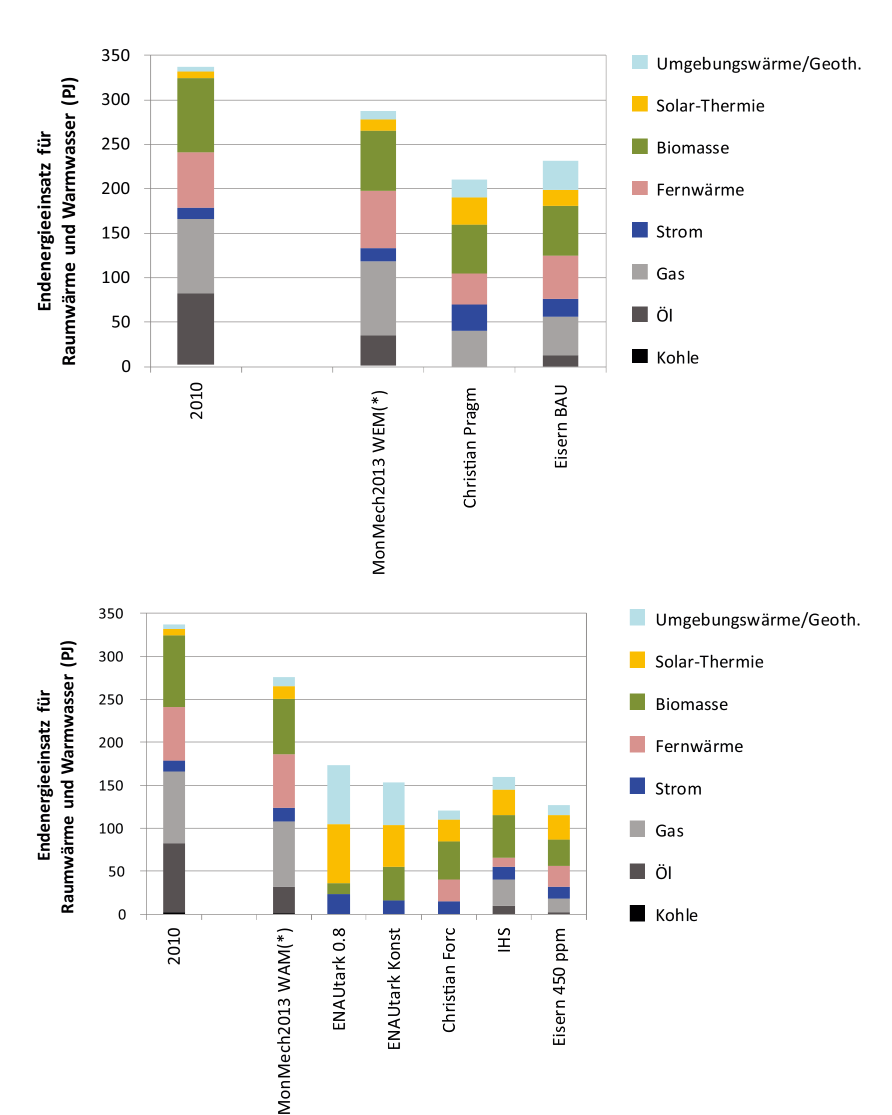


Abbildung 3.17 Current Policy Initiatives (CPI)-Szenarien der Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser aus verschiedenen Energieträgern in Österreich bis 2030/2050 im Vergleich zu 2010 in verschiedenen Studien. Quelle: eigene vergleichende Darstellung

Figure 3.17 Current Policy Initiatives (CPI) scenarios for space and water heating from different energy carriers in Austria until 2030/2050 in comparison to 2010 in different studies. Source: own comparative graph

(*) Die Ergebnisse zum Szenario MonMech20130 WEM repäsentieren das Jahr 2030, die anderen Szenarien das Jahr 2050.

Abbildung 3.18 New Policy Initiatives (NPI)-Szenarien der Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser aus verschiedenen Energieträgern in Österreich bis 2030/2050 im Vergleich zu 2010 in verschiedenen Studien. Quelle: eigene vergleichende Darstellung

Figure 3.18 New Policy Initiatives (NPI) scenarios for space and water heating from different energy carriers in Austria until 2030/2050 in comparison to 2010 in different studies. Source: own comparative graph

(*) Die Ergebnisse zum Szenario MonMech20130 WEM repäsentieren das Jahr 2030, die anderen Szenarien das Jahr 2050.

werden und Stromspeicher sowie Smart Grids eine wesentlich bedeutendere Rolle im Stromsystem spielen werden als derzeit (Haas, 2013).

Der Einsatz erneuerbarer Energieträger für die Wärmeversorgung

Im Bereich der Wärmeversorgung liegen die wichtigsten erneuerbaren Potenziale bei folgenden Technologien und Energieträgern:

- Feste Biomasse
- Solar-thermische Kollektoren
- Umweltwärme
- Geothermie
- Biomassenutzung aus KWK

Die Entwicklung der Wärmeaufbringung in Szenarien in verschiedenen Studien im Vergleich zu 2010 sind in Abbildung 3.17 und Abbildung 3.18 vergleichend dargestellt. Es zeigen sich zwei Effekte: Eine große Bandbreite zwischen 120 und 220 PJ bis 2050 und ein sehr unterschiedlicher Mix, bei dem die fossilen zwischen 0 PJ und ca. 50 PJ liegen.

Die Szenarien wurden in die Gruppen „Current Policy Initiatives“ (CPI) sowie „New Policy Initiatives“ (NPI) gruppiert. Der Anteil der fossilen Energieträger (ohne fossile Energie in Fernwärme und Strom) sinkt in den CPI-Szenarien von derzeit (2010) etwa 50 % bis 2050 auf ca. 20–25 % und der Anteil erneuerbarer Wärme (ohne erneuerbaren Anteil in Fernwärme und Strom) steigt von derzeit (2010) etwa 25 % auf 45–50 %. Hingegen liegt der Anteil fossiler Energie in den NPI-Szenarien 2050 zwischen 0 % und 25 % und der Anteil erneuerbarer zwischen 55 % und 90 %.

Der Anteil EET liegt relativ eng zwischen 120 und 155 PJ. Allerdings sind die Aufteilungen nach Technologien äußerst unterschiedlich. Während bei „EnergieAutark“ Solarthermie und Wärmepumpen überwiegen, ist in den meisten anderen Szenarien die Biomasse dominierend. Der Technologie- und Energieträgermix ist wesentlich durch die Fragen bestimmt, in welchem Ausmaß Biomasse nach wie vor für Wärmezwecke eingesetzt werden soll oder für andere Zwecke (Industrielle energetische Anwendungen, stofflicher Einsatz, Verkehr) benötigt wird, bzw. wie stark die erneuerbare Stromproduktion wächst und in welchem Ausmaß der Einsatz von Strom in Form von Wärmepumpen daher auch im Wärmesektor Sinn macht. Allerdings ist auch anzumerken, dass in allen betrachteten Szenarien der absolute Beitrag von Biomasse zur Wärmebereitstellung bis 2050 sinkt, wenn auch mit steigenden relativen Marktanteilen.

Darüber hinaus ist das Ausmaß des solarthermischen Beitrags wesentlich auch durch die technologische Entwicklung im Bereich der Wärmespeicher, Kostenreduktionen bei Systempreisen sowie die Marktdurchdringung von Niedertemperatur-Heizsystemen auch im Gebäudebestand geprägt. Sowohl Solarthermie als auch Umgebungswärme könnten bei geeigneter Systemintegration durch eine verstärkte und ambitionierte umfassende Strategie zur Gebäudesanierung deutlich höhere Marktanteile an der Bereitstellung von Raumwärme erhalten. Dies ist im Wesentlichen durch die geringere benötigte Vorlauftemperatur erklärbar und damit durch den effizienteren Betrieb von Wärmepumpen einerseits und die bessere Nutz. B. arkeit solar bereitstellbarer Temperaturniveaus auch während der Heizsaison andererseits. Für Biomasse-Heizsysteme stellen sich andererseits wieder spezifische technologische Herausforderungen, wenn es um die Bereitstellung von Raumwärme im kleinen und kleinsten Leistungsbereich geht.

3.1.7 Optionen für den Klimaschutz III (zur Verringerung der THG-Emissionen) – bei der Energienutzung: Szenarien des Energieverbrauchs

In diesem Kapitel werden Szenarien des Energieverbrauchs verglichen, die zeigen, welche Entwicklungen in Abhängigkeit von verschiedenen implementierten Portfolios von Politiken möglich sind.

Dabei werden jeweils BAU-Szenarien und ambitionierte POLICY-Szenarien vergleichend gegenüber gestellt, die schließlich den gesamten möglichen Handlungsspielraum für energiepolitische Instrumente aufspannen und die Bandbreite der möglichen Entwicklungen aufzeigen.

Für die folgenden Kategorien werden diese Szenarien dargestellt:

- Strom nach Sektoren und Anwendungen
- Strom nach Energieträgern zur Erzeugung
- Wärme nach Sektoren und Anwendungen
- Wärme nach Energieträgern zur Erzeugung

Ein Überblick zu Energieszenarien für Österreich

Im Folgenden werden die wichtigsten Studien mit Szenarien des Österreichischen Energieverbrauchs bis 2020 bzw. 2050 kurz beschrieben.

In Streicher et al. (2010) werden für das gesamte österreichische Energiesystem Optionen analysiert, um das österreichische Energiesystem bis 2050 autark zu machen. Es wird dabei das Wirtschaftswachstum als einziger Treiber berücksichtigt und zwei Szenarien mit 0,0 % und 0,8 % Wachstum untersucht. Insgesamt verringert sich der Endenergiebedarf 2050 gegenüber 2008 um über 50 % auf knapp 500 PJ (Konstant-Szenario) bzw. knapp 40 % auf 640 PJ (Wachstums-Szenario). Durch zusätzliche Effizienzmaßnahmen könnte er noch weiter verringert werden. Der PEV wird zu 100 % durch EET gedeckt.

Interessant ist weiters, dass im Szenario ohne Wachstum der Stromverbrauch auf 58 TWh sinkt (von 68 TWh im Jahr 2008) und im 0,8 %-Wachstumsszenario auf 76 TWh steigt.

In dieser Studie wurden allerdings keine ökonomischen Kriterien berücksichtigt und teilweise einige sehr teure Technologien wie Tiefengeothermie eingesetzt. Auch sind in dieser Studie zwar technische Strukturänderungen – z. B. der Modi im Verkehr – berücksichtigt, es sind allerdings keine wirtschaftlichen Maßnahmen präzisiert, die zu diesen Veränderungen führen.

In Umweltmanagement Austria (2011) wird für alle Sektoren der Energiebedarf nach Anwendungen bis 2050 analysiert. Es werden effiziente Technologien bis 2050 eingeführt und schließlich kommen die Autoren für den Endenergiebedarf 2050 zu ähnlichen Werten wie Streicher et al. (2010): auf knapp 500 PJ (Forciertes Szenario) bzw. ca. 720 PJ (Pragmatisches Szenario).

Bliem et al. (2011) analysieren eine „Energy [R]evolution 2050“. Dieses Projekt stellt eine mögliche Energiezukunft für Österreich dar. Konkret wird aufgezeigt, wie sich der Energieverbrauch der einzelnen Sektoren ändern muss, um im Jahr 2050 über 80 % des energetischen Endverbrauchs mittels erneuerbaren Energieträgern zu decken und gleichzeitig mehr als 90 % der CO_2-Emissionen im Vergleich zum Jahr 2008

einzusparen. Die Studie zeigt, dass das vorhandene Potenzial an erneuerbaren Energieträgern in Österreich ausreicht, um das Energiesystem nachhaltig zu gestalten. Allerdings wird auch deutlich, dass ein Umstieg auf EET drastische Einsparungen beim Endenergieverbrauch bedingt und Strukturbrüche und Veränderungen unausweichlich sein werden. Bliem et al. (2011) zeigen weiters, welche Maßnahmen und Weichenstellungen heute notwendig sind, um bis zum Jahr 2050 den Großteil des Endenergieverbrauchs mittels erneuerbarer Energien zu decken und gleichzeitig die CO_2-Emissionen um mehr als 90 % senken zu können.

Im NREAP-AT (BMWFJ, 2010) werden Referenz- und Effizienz-Szenarien gegenübergestellt. Entsprechend den Vorgaben der Energiestrategie Österreich gelten für 2020 folgende Zielgrößen für das Effizienz-Szenario:

- Der Endenergieverbrauch wird mit 1 100 PJ limitiert
- Unter Berücksichtigung von Eigenverbrauch und Transportverlusten ergibt sich somit ein Brutto-Energieverbrauch bei Endenergie von 1 135 PJ

Die Werte des NREAP-AT werden in der Literatur auch kritisch diskutiert. Die umfassendste Analyse in Bezug auf Optionen für den Wärmesektor in Österreich dokumentiert Kranzl et al. (2013b). Das Ziel der Arbeit ist es, die möglichen zukünftigen Potenziale an EET in Abhängigkeit von verschiedenen Effizienzentwicklungen im Gebäudebestand dynamisch bis 2030 zu untersuchen. Dabei werden auch mögliche Politiken wie Subventionen mitberücksichtigt. Die wichtigste Schlussfolgerung aus diesen Analysen ist, dass die im Österreichischen NREAP enthaltenen Ziele für EET im Bereich der Wärme sehr moderat sind und eigentlich schon in einer BAU-Entwicklung übertroffen werden.

Stocker et al. (2011) analysieren die möglichen Effekte eines deutlichen Anstiegs EET basierend auf Ausgangsdaten des Jahres 2005 basierend auf Stakeholder- und Expertendiskussionen. Die wichtigste Schlussfolgerung aus diesen Analysen ist, dass die Steigerung der Energieproduktion aus EET in Österreich unzureichend ist, um ein nachhaltiges Energiesystem zu realisieren. Stocker et al. (2010) stellen schließlich fest: „A substantial increase in energy efficiency and a reduction of residential energy consumption also form important cornerstones of a sustainable energy policy."

Köppl et al. (2011) diskutieren in „Energy Transition 2012\2020\2050" Strategien für eine nachhaltige Restrukturierung des Energiesystems. In der Studie werden Optionen zur Erreichung der österreichischen 2020-Ziele aus dem EU-Energie- und Klimapaket in einem interdisziplinären Ansatz analysiert. Insgesamt werden 25 Storylines und Technologieoptionen („technology wedges") entwickelt und in einem Bottom-up-Ansatz ausgehend von den Energiedienstleistungen analysiert. Die Technologieoptionen werden bezüglich ihrer Wirkung im Energiesystem sowie hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf Energieflüsse und Emissionen diskutiert. Die Analyse von Veränderungen im Energiesystem wird durch eine ökonomische Analyse ergänzt, wobei einerseits im Rahmen einer Input-Output-Analyse Beschäftigungs- und Wertschöpfungseffekte in der Investitionsphase und andererseits Veränderungen der Betriebskosten ermittelt werden.

Das Ziel des Projekts AWEEMSS (Reichl et al., 2010) ist die Evaluierung möglicher Strategien zur Verbesserung der Endenergieeffizienz im Rahmen der Richtlinie 2006/32/EG (EU, 2006) des Europäischen Parlaments und des Rates über Endenergieeffizienz und Energiedienstleistungen bis zum Jahr 2016. AWEEMSS untersucht im Detail fünf Energieeffizienz-Strategien die aus Kombinationen von Mindeststandards und intensiven monetären Förderungen bestehen. Das Ergebnis ist, dass in der Maximalvariante Einsparungen von ca. 27 TWh / Jahr realisiert werden können. Dazu ist allerdings ein öffentlicher Förderaufwand von 14 Mrd. € erforderlich.

In Schleicher und Köppl (2014) werden Energieperspektiven für Österreich – Strukturen und Strategien von 2020 bis 2050 diskutiert. Dieser Untersuchung zufolge sinkt der PEV bis 2050 – unter der Voraussetzung, dass die 2020-Ziele der EU erreicht werden – auf 638 PJ. Details zu den energiepolitischen Maßnahmen, auf denen diese Entwicklung basiert, waren bei Redaktionsschluss dieses Reports noch nicht verfügbar.

Szenarien der Stromnachfrage

Dieser Abschnitt bietet einen Überblick über die mögliche künftige Entwicklung der Nachfrage nach elektrischer Energie in Österreich, wobei auf diverse in der Literatur diskutierte Szenarien und Prognosen zurückgegriffen wird. Komplementär hierzu werden nachfolgend mögliche Entwicklungen aufbringungsseitig diskutiert. Verschiedene Szenarien sollen Auskunft über zu erwartende technologische Trends und den Energieträgermix geben. Aufgrund der österreichischen Spezifika und des im Rahmen dieses Berichts untersuchten thematischen Kontexts wird hierbei ein Schwerpunkt auf die Analyse des möglichen Einsatzes erneuerbarer Energieträger gelegt.

Die Literaturrecherche lieferte eine umfassende Palette an Szenarien und Studien, welche für die stromseitigen Betrachtungen verwendet wurden. Konkret sei hierbei angemerkt,

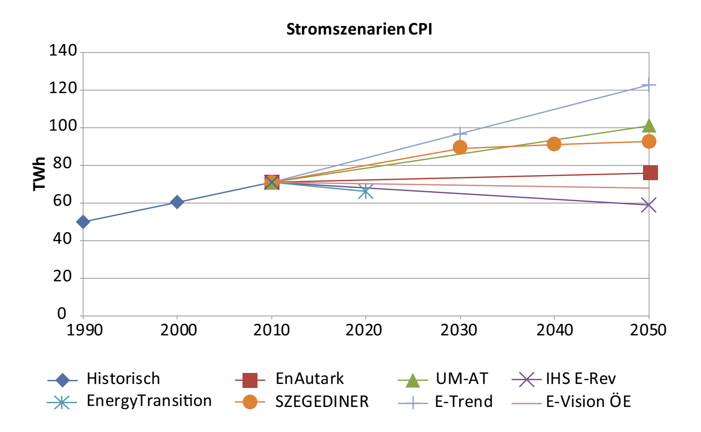


Abbildung 3.19 Entwicklung der Stromnachfrage bis 2050 in verschiedenen Studien im Vergleich zu 2010 in Current Policy Initiatives (CPI-Szenarien). Quelle: eigene vergleichende Darstellung

Figure 3.19 Development of electricity demand until 2050 in different studies in comparison to 2010 in Current Policy Initiatives (CPI) scenarios. Source: own comparative graph

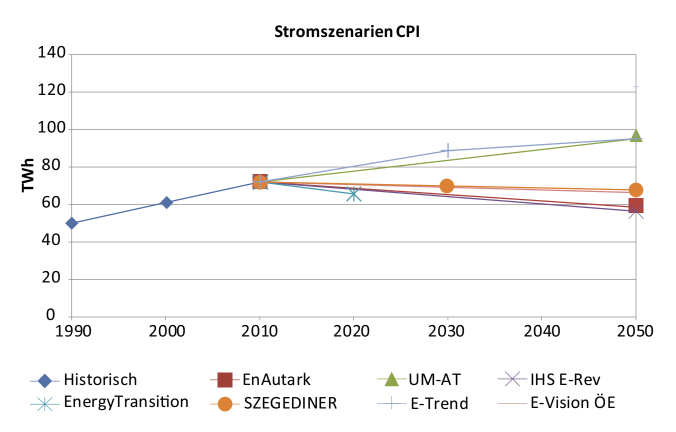


Abbildung 3.20 Entwicklung der Stromnachfrage bis 2050 in verschiedenen Studien im Vergleich zu 2010 in NPI-Szenarien. Quelle: eigene vergleichende Darstellung

Figure 3.20 Development of electricity demand in different studies until 2050 in comparison to 2010 in New Policy Initiatives (NPI) scenarios. Source: own comparative graph

dass lediglich Szenarien, die im aktuellen Konnex stehen bzw. die in der jüngeren Vergangenheit erstellt wurden, Berücksichtigung fanden. Weiters sei angemerkt, dass nachfolgend eine Zweigliederung der Szenarien erfolgte: Um den im Rahmen der Studien ermittelten Einfluss der Energiepolitik zu verdeutlichen, wurde hierbei eine Unterteilung der untersuchten Fälle in die Gruppen „Current Policy Initiatives“ (CPI) sowie „New Policy Initiatives“ (NPI) vorgenommen.

Die betrachteten CPI-Szenarien sind:

- EnAutark 0.8: Szenario zur Erreichung eines energieautarken Zustands in Österreich 2050 unter Annahme eines Wirtschaftswachstums in der Höhe von 0,8 % pro Jahr aus Streicher et al. (2010)
- UMA Pragm.: Szenario mit geringer politischen Ambition und keinen verstärkten Klimaschutzanstrengungen aus Umweltmanagement Austria (2011)
- IHS: Referenzszenario aus dem Projekt „Energie [R]evolution Österreich 2050“ (Bliem et al., 2011)
- EnergyTransition: Referenzszenario (Köppl et al., 2011)
- Szegediner: Referenzszenario aus Haas et al. (2009)
- Energy-Trend: Referenzszenario aus Auer (2010)
- E-Vision ÖE: Business-as-usual Szenario gemäß Renner et al. (2010)

Die Liste an ausgewählten alternativen Szenarien, welche den Einfluss neu zu implementierender energiepolitischer Maßnahmen unterstellen, umfasst folgende Quellen:

- EnAutark 0.0: Szenario zur Erreichung eines energieautarken Zustands in Österreich 2050 unter Annahme eines gleich bleibenden BIPs aus Streicher et al. (2010)
- UMA ambit: Szenario mit hoher politischen Ambition und großen Klimaschutzanstrengungen aus Umweltmanagement Austria (2011)
- IHS: Alternatives Szenario aus dem Projekt „Energie [R] evolution Österreich 2050“ (Bliem et al., 2011)
- EnergyTransition: Effizienzszenario (Köppl et al., 2011)
- Szegediner: Alternatives Szenario aus Haas et al. (2009)
- Energy-Trend: Alternatives Szenario aus Auer (2010)
- E-Vision ÖE: Alternatives Szenario gemäß Renner et al. (2010)

Es sei weiters angemerkt, dass alle aufgelisteten Studien Aussagen zum Strombedarf liefern, welche nachfolgend vergleichend dargestellt werden. Der zu erwartende aufbringungsseitige Energieträgermix im Fokusjahr 2050 ist aber nicht in allen Studien erkennbar, weshalb hierbei nur auf eine begrenztere Auswahl zurückgegriffen werden kann.

Die Entwicklung der Stromnachfrage in Szenarien in verschiedenen Studien im Vergleich zu 2010 ist in den nachfolgenden Abbildungen vergleichend dargestellt. Bei Fortführung bereits derzeit implementierter Lenkungsmaßnahmen, also der in Abbildung 3.19 veranschaulichten CPI-Szenarien, zeigt sich gemäß Literatur eine große Bandbreite bei der sich langfristig ergebenden Nachfrage: Ein Strombedarf zwischen 60 und 120 TWh ist folglich für das Jahr 2050 zu erwarten. Die Bandbreite wird deutlich enger (d. h. für 2050

wird eine Nachfrage in Höhe von 60 bis rund 90 TWh prognostiziert), wenn alternative energiepolitische Instrumente in Betracht gezogen werden (vgl. Abbildung 3.20 zu NPI-Szenarien). Hier zeigt sich der klare Einfluss von zusätzlichen energiepolitischen Maßnahmen zur Steigerung der nachfrageseitigen Energieeffizienz bzw. zur Minderung des Energieverbrauchswachstums im Allgemeinen.

Generell ist bemerkenswert, dass in nahezu allen betrachteten Szenarien von einem Anstieg des Stromverbrauchs ausgegangen wird. Dies lässt darauf schließen, dass strombasierte Energiedienstleistungen in Zukunft an Bedeutung gewinnen werden – sei es nun durch eine Ausweitung der Elektromobilität oder aufgrund von Substitutionen bei industriellen Prozessen oder durch andere Effekte.

Maßnahmen im Bereich der Stromnachfrage

Im Bereich strombasierter Energiedienstleistungen existiert in Österreich ein beträchtliches Energieeinsparpotenzial. Allerdings bedarf es großer Anstrengungen dieses zu heben. Dabei existiert kein singulär anwendbares Instrument sondern es ist ein – sich über die Zeit ändernder – Instrumentenmix zu implementieren.

Die umfassendsten Darstellungen in Bezug auf effizientere Stromnutzung und Stromsparmaßnahmen finden sich in POTETA (Haas et al., 2011b) und in AWEEMSS (Reichl et al., 2010). AWEEMSS dokumentiert umfassend für praktisch alle strombetriebenen Geräte großer bis mittlerer Leistung von Beleuchtung, Weißware, Pumpen bis zu Fernsehgeräten, Computern – von Betriebs- bis zu Stand-by-Aspekten – umfassend die Details verschiedener Geräteklassen und auch die entsprechenden Einsparpotenziale und Kosten.

Diesen Studien folgend kann das Einsparpotenzial langfristig nur dann umfassend und nachhaltig mobilisiert werden, wenn die folgenden zentralen Bedingungen erfüllt werden:

- Höheres Strompreisniveau gemessen am verfügbaren Budget (Haushaltseinkommen bzw. Wertschöpfung der Unternehmen): Ein höherer Strompreis kann durch CO_2-Besteuerung, eine Energiesteuer oder einfach durch Stromknappheit auf dem Markt bewirkt werden. Dabei würden die beiden ersten Varianten einen gesellschaftlichen Nutzen bringen, die Variante höherer Strompreise durch Knappheit würde vor allem den Unternehmen nützen.
- Eine technologische Effizienzrevolution ist nur durch eine Kombination von intensiver Forschung und Entwicklung mit legistischen Maßnahmen zu realisieren. Strenge dynamische Höchstverbrauchsstandards für alle Geräte, sowie das Verbot schlechter Geräte sind vorrangig. Darüber hinaus werden diese vor allem auch von einer Abkopplung der Stromverbraucher von der Steckdose begleitet werden, vor allem um den Rebound-Effekt, der eine Steigerung der Nachfrage nach Energiedienstleistungen dadurch bewirken würde, dass diese billiger werden würden.
- Übergang vor allem bei Großverbrauchern auf „Contracting“: Die professionelle Bereitstellung von Energiedienstleistungen durch entsprechende Unternehmen führt dazu, dass eben die Bereitstellung des gesamten Services kostenminimiert wird und nicht nur Strom und Technologie separat.

Ergänzend dazu tragen Anreiz- und Informations-Systeme (z. B. Labelingsysteme) dazu bei, dass schon in den nächsten Jahren die schlechtesten Geräte aus dem Bestand eliminiert werden und somit der Übergang auf ein nachhaltiges System beschleunigt wird.

Insgesamt ist im Bereich der Wohngebäude ein hoher Bedarf an Auditing und Monitoringaktivitäten gegeben, um sukzessive Schwachstellen aufzuspüren und zu beseitigen. Kontinuierlich könnte das vor allem durch entsprechende öffentliche Energiebeauftragte, z. B. umgeschulte RauchfangkehrerInnen realisiert werden.

Szenarien der Nachfrage im Bereich Raumwärme, Klimatisierung und Warmwasserbereitstellung

Im Folgenden sind für Raumwärme und Warmwasser die Nachfrage sowie der eingesetzte Energieträgermix in verschiedenen Szenarien gegenübergestellt und diskutiert. Prozesswärme wird hier nicht diskutiert, da dieser Teilbereich im Abschnitt Industrie dargestellt ist.

In den letzten Jahren wurde eine relevante Anzahl an Szenarien zum Raumwärmesektor erstellt. Die Verfügbarkeit wissenschaftlich begutachteter („peer-reviewed“) Literatur ist allerdings beschränkt (z. B. Stocker et al., 2011; Kranzl et al., 2012). Wir fokussieren daher im Folgenden auf die Gegenüberstellung grauer Literatur (im Wesentlichen Projektberichte). Aus der breiten Palette an Studien wurden jene ausgewählt, die einen längeren Betrachtungszeitraum bis 2030 bzw. 2050 aufweisen und die Bandbreite der Szenarien in der Literatur gut abdecken. Konkret werden die folgenden Szenarien der historischen Entwicklung 1990 bis 2010 gegenübergestellt:

- EnAutark 0.8: Szenario zur Erreichung eines energieautarken Zustands in Österreich 2050 unter Annahme von Wirtschaftswachstum und dadurch induzierten Wachstums in der Höhe von 0,8 % pro Jahr aus Streicher et al. (2010)
- EnAutark 0.0: Szenario zur Erreichung eines energieautarken Zustands in Österreich 2050 unter Annahme konstanten BIPs (Streicher et al., 2010)
- EnergyTransition: Referenzszenario (Köppl et al., 2011)
- IHS: Szenario aus dem Projekt „Energie [R]evolution Österreich 2050" (Bliem et al., 2011)
- MonMech2013 WEM: Szenario „with existing measures" basierend auf den mit Stand 2011 implementierten politischen Instrumenten aus Müller und Kranzl (2013); dieses Szenario wurde bis 2030 gerechnet
- MonMech2013 WAM: Szenario „with additional measures" unter Berücksichtigung der im Jahr 2011 in konkreter politischer Diskussion bzw. Umsetzung begriffenen Maßnahmen aus Müller und Kranzl (2013); dieses Szenario wurde bis 2030 gerechnet
- UMA Pragm: Szenario mit geringer politischen Ambition und keinen verstärkten Klimaschutzanstrengungen aus Umweltmanagement Austria (2011)
- UMA Ambit: Szenario mit hoher politischen Ambition und großen Klimaschutzanstrengungen aus Umweltmanagement Austria (2011)
- Eisern BAU: Business-as-usual Szenario aus Müller et al. (2013)
- Eisern 450 ppm: Szenario unter Erreichung eines ambitionierten Klimaschutzzieles 2050 (konsistent mit der Erreichung eines globalen 450 ppm Ziels) aus Müller et al. (2013)

Die Entwicklung der Wärmenachfrage in Szenarien verschiedener Studien im Vergleich zu 2010 ist in Abbildung 3.21 vergleichend dargestellt. In allen Studien zeigen sich zwei Effekte: Eine deutliche Reduktion und eine große Bandbreite zwischen 120 und 220 PJ im Jahr 2050. Offensichtlich zeigt sich in allen Studien die Erwartung, dass die Energiedienstleistung „behaglich Wohnen" in Zukunft wesentlich effizienter bereitgestellt wird. Dies gründet sich auf die großen Energieeffizienzpotenziale, die sich durch Gebäudesanierung erreichen lassen. Der Umfang der erzielbaren Einsparungen variiert in durchaus relevantem Ausmaß. Ursachen für diese Abweichungen sind im Wesentlichen:

- Unterschiedliche Grundannahmen hinsichtlich des Ausmaßes klimapolitischer Anstrengungen und der implementierten politischen Zielsetzungen und Maßnahmen

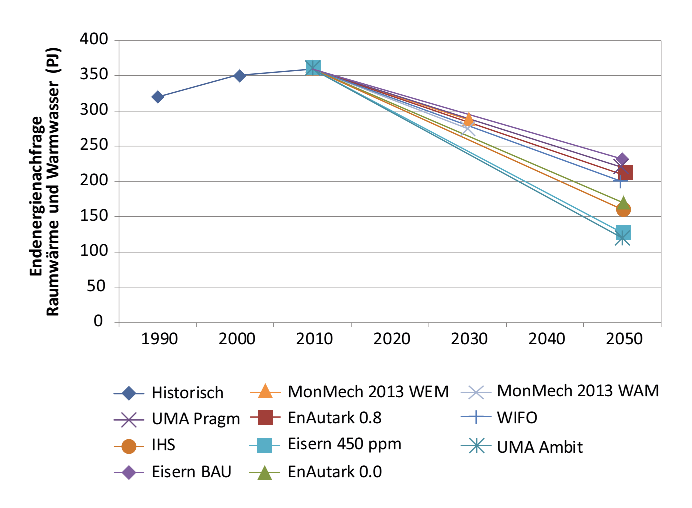


Abbildung 3.21 Entwicklung der Energienachfrage für Raumwärme und Warmwasser bis 2050 in verschiedenen Studien und Szenarien. Quelle: eigene vergleichende Darstellung

Figure 3.21 Development of energy demand for space and water heating until 2050 in different studies and scenarios. Source: own comparative graph

- Unterschiedliche Beurteilung der Effektivität von Maßnahmen; insbesondere die Auswirkung von Rebound-Effekten wird – auch je nach Methodik – unterschiedlich bewertet. Allerdings hat es sich in den vergangenen Jahren durchaus etabliert, in der Bewertung der realen Auswirkung von Energieeffizienzmaßnahmen auf erzielbare Energieeinsparungen auch Rebound-Effekte zu berücksichtigen
- Unterschiedliche Annahmen zur Entwicklung der zu konditionierenden klimatisierenden Gebäudenutzflächen
- Unterschiedliche methodische Ansätze und Datengrundlagen; insbesondere im Sektor Nicht-Wohngebäude existieren nach wie vor erhebliche Datenlücken
- Nicht zuletzt sind auch die realen Ausgangswerte für den Ausgangszustand durchaus unterschiedlich aufgrund unterschiedlicher Basisjahre und leicht abweichender methodischer Aspekte (z. B. hinsichtlich Klimakorrektur etc.)

Einige Projekte befassen bzw. befassten sich auch mit der Auswirkung des Klimawandels auf Heiz- und Kühlenergiebedarf (z. B. Prettenthaler und Gobiet, 2008; Kranzl et al., 2010). Aktuell laufende Projekte dazu sind z. B. die ACRP-Projekte EL.ADAPT, CLEOS sowie PRESENCE. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass je nach Klimaszenario der Heizenergiebedarf bis 2050 um etwa 3–8 % gegenüber den nicht-klimasensitiven Referenz-Läufen absinken könnte sowie bis 2080 um etwa 7–13 %. Hinsichtlich des Kühlenergiebedarfs liegt die größte offene Frage und Unsicherheit darin, inwiefern es

aufgrund des Klimawandels zu einer – im Vergleich zur nicht klimasensitiven Referenz – zu höherer Diffusion von Klimageräten und konditionierten Flächen kommt. Je nach Klimaszenario und Annahme zur Diffusion von Klimageräten ergibt sich dadurch bis 2050 eine große Bandbreite von 2–12 TWh elektrischer Endenergienachfrage zur Raumkühlung. Durch entsprechende gebäudeseitige Effizienzmaßnahmen lässt sich allerdings die Kühlnachfrage deutlich reduzieren. Absolut gesehen liegt damit der Kühlenergiebedarf auch bis 2050 deutlich unter der Nachfrage nach Raumwärme und Warmwasser. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass jener praktisch ausschließlich mit Elektrizität gedeckt wird und außerdem ohne entsprechende Anpassungsmaßnahmen hohe Lastspitzen resultieren können.

Maßnahmen im Bereich Raumwärme, Klimatisierung und Warmwasserbereitstellung

Im Haushalts- und Dienstleistungssektor sowie im Wärmebereich sind folgende Maßnahmen vorrangig:

- Umfassende thermische Sanierung der bestehenden Gebäudesubstanz.
- Realisierung von thermischen Standards für Neubauten, die Plusenergiehäusern entsprechen.
- stärkere Marktdurchdringung erneuerbarer Heiz- und Warmwassersysteme.

Wichtige offene Fragen hinsichtlich zukünftiger Klimaschutzmaßnahmen im Gebäudesektor, die in den aktuellen Studien kontroversiell gesehen bzw. noch nicht eindeutig beantwortet wurden, sind unter anderem:

- Welche innovativen politischen, wie regulativen Instrumente müssen zur Erreichung eines weitestgehend CO_2-neutralen Gebäudebestands 2050 umgesetzt werden, insbesondere um Anreizwirkungen zur umfassenden Gebäudesanierung zu erzielen?
- Einige Studien deuten darauf hin, dass die Qualität und Tiefe der thermischen Sanierungsmaßnahmen, die jetzt und in den kommenden Jahren gesetzt werden, essentiell für einen hohen Gebäudestandard im Bestand des Jahres 2050 sein wird. Eine Forcierung der Sanierungsrate ohne entsprechende umfassende Qualitätskriterien zu setzen, könnte sich daher für eine ambitionierte Zielsetzung Richtung 2050 als abträglich erweisen. Der richtige Mix von Sanierungsqualität und Quantität ist daher als offene Frage einzustufen.
- Welche Rolle spielen Wärmenetze in einem zukünftigen Low-Carbon-Energiesystem? Insbesondere in ländlichen Regionen weisen Wärmenetze nach thermischer Sanierung der versorgten Gebäude eine sehr geringe Wärmedichte, damit hohe Wärmeverluste und schwierige ökonomische Rahmenbedingungen auf. Gleichzeitig bergen Wärmenetze v. a. in urbanen Räumen das Potenzial, den Übergang zu erneuerbarer Wärmeversorgung zu gewährleisten und eine optimale Integration mit der Fluktuation volatiler Stromerzeugung zu ermöglichen.
- Bei der optimalen Integration und Abstimmung verschiedener erneuerbarer Optionen existiert keine klare Antwort. Dieser Frage ist für unterschiedliche Gebäudetypen und Anwendungsbereiche weiterhin Aufmerksamkeit zu widmen.

Als synergetische Anpassungs- und Klimaschutzmaßnahmen werden im Energiesektor vor allem folgende Maßnahmen genannt (siehe auch Band 3, Kapitel 1):

- Durch passive Maßnahmen zur Reduktion der Kühllast von Gebäuden kann das Behaglichkeitsniveau v. a. in Wohngebäuden auch bei hinkünftig heißerem Klima ohne aktives Kühlsystem gewährleistet werden.
- Die Reduktion innerer Lasten reduziert einerseits den Strombedarf durch effizientere elektrische Geräte und andererseits den Wärmeeintrag, der andernfalls durch ein aktives Kühlsystem v. a. unter hinkünftig heißerem Klima weggekühlt werden müsste.
- Photovoltaik weist eine sehr gute zeitliche Deckung mit Kühllasten auf und bietet daher als Kapazitätsbeitrag im Sommer eine wichtige Maßnahme zur Reduktion von Stromlastspitzen.

3.1.8 Optionen für Adaptation (Anpassung an den Klimawandel)

Der Energiesektor ist aufgrund des hohen Anteils an THG-Emissionen vor allem hinsichtlich notwendiger Klimaschutzmaßnahmen von Relevanz. Gleichzeitig ist der Energiesektor auch vom Klimawandel betroffen.

Die Sensitivität des Energiesektors gegenüber dem Klimawandel fokussiert vor allem auf der Stromerzeugung aus EET und der Energienachfrage aus verändertem Heiz- und Kühlbedarf. Aufgrund der großen Bedeutung der Wasserkraft im österreichischen Erzeugungsmix spielen potenzielle Auswirkungen des Klimawandels auf Grund veränderter Niederschlagsmengen und -muster (jahreszeitliche Verschiebung,

Veränderung von Starkregenereignissen) sowie veränderten Abflussmengen durch erhöhte Verdunstung eine besondere Rolle. Aber auch Windkraftwerke sowie Photovoltaikanlagen und Solarthermiekraftwerke können über veränderte Windverfügbarkeit und globale Einstrahlung betroffen sein. Konventionelle Kraftwerke sind indirekt über die Verfügbarkeit von Kühlwasser betroffen sowie über potenzielle Auswirkungen von Extremereignissen. Auch bei Biogas- und Biomasseanlagen ergeben sich potenzielle Auswirkungen über die durch den Klimawandel veränderte Verfügbarkeit von biogenen Rohstoffen. Weitere Auswirkungen, v. a. von Extremereignissen ergeben sich auch für die Infrastruktur, wie Netze und Kraftwerke.

Auswirkungen auf Erzeugung und Nachfrage

Im Detail wurden die Auswirkungen des Klimawandels auf Erzeugung und Nachfrage in den folgend beschriebenen Studien analysiert. Im Projekt EL.ADAPT (Bachner et al., 2013) wurden die Auswirkungen des Klimawandels auf die Elektrizitätswirtschaft für Kontinentaleuropa modellbasiert untersucht, wobei nur die Auswirkungen auf Wasserkraft, Wind, Solar und konventionelle Kraftwerke sowie auf die Nachfrage berücksichtigt wurden. Für Österreich ergab sich, je nach zu Grunde liegendem Klimaszenario, eine Veränderung des Regelarbeitsvermögens zwischen +1,14 TWh und –2,58 TWh in der Periode 2031 bis 2050 relativ zu einer Entwicklung ohne Klimawandel. Diese Effekte sind v. a. auf Veränderungen für Laufwasserkraftwerke (±1 TWh) sowie Speicherkraftwerke (+0,5 / –1,5 TWh) zurückzuführen. In allen untersuchten Szenarien nimmt der Heiz. B.edarf in Österreich gegenüber heute deutlich ab und bei konservativen Annahmen betreffend die Anschaffung von zusätzlichen Klimaanlagen kehrt der zusätzliche Strombedarf für Kühlung diesen Effekt für die Periode 2031 bis 2050 auch nicht um, sodass sich geringfügige Einsparungen für die Periode 2031 bis 2050 gegenüber heute im Ausmaß von ca. –1 % ergeben könnten.

Das Projekt KlimAdapt (Kranzl et al., 2010) untersuchte Auswirkungen des Klimawandels auf die Nachfrage nach Heizen und Kühlen, sowie auf das Angebot von Wasserkraft und forstlicher Biomasse in Österreich. Die Ergebnisse zeigten bis Mitte des Jahrhunderts eine Abnahme der Wasserkraftproduktion um 1,1–4,8 TWh_{el} sowie eine Verschiebung der Wasserkraftproduktion vom Sommer- in das Winterhalbjahr. Im Sektor forstlicher Biomasse-Nutzung konnten regional gegenläufige Tendenzen gezeigt werden, die sich einerseits durch die Trockenheit in nieder gelegenen Regionen und andererseits durch einen erhöhten Zuwachs in höher gelegenen Regionen ergeben. Die Energie-Nachfrage nach Heizen reduziert sich aufgrund des Klimasignals im Bereich von 3–6 %. Dem steht ein Anstieg der Kühlenergie-Nachfrage gegenüber, deren Einfluss vor allem aufgrund der unsicheren zukünftigen Diffusion von Klimaanlagen im Gebäudebestand in einer großen Bandbreite von etwa 1,5–10 TWh_{el} im Extremfall eines heißen Klimaszenarios und hoher Diffusion von Klimaanlagen liegen könnte.

Eine Analyse der volkswirtschaftlichen Effekte dieser Veränderungen von Erzeugung und Nachfrage unter Berücksichtigung internationaler Feedbackeffekte zeigt, dass die Effekte auf andere Sektoren den Effekt auf den Elektrizitätssektor selbst verstärken oder kompensieren können. Ob andere Sektoren durch die Klimwandelfolgen im Elektrizitätssektor positiv oder negativ betroffen sind, hängt im Wesentlichen davon ab, wie Zu- oder Abnahmen des Regelarbeitsvermögens von EET mit steigender oder sinkender Elektrizitätsnachfrage zusammenwirken. Ist die Verfügbarkeit von Elektrizität aus EET niedrig, die Nachfrage aber hoch, muss die Nachfrage durch fossile Energieträger (v. a. Gaskraftwerke) gedeckt werden, was den CO_2-Preis erhöht und auch zu steigenden Elektrizitätspreisen führt. Diese vergleichsweise höheren Preise wirken sich wiederum negativ auf v. a. energieintensive Sektoren aus, weshalb es in diesem Fall zu negativen Auswirkungen auf andere Sektoren kommt (Bachner et al., 2013). Weiters zeigt sich in den Modellrechnungen, dass für die Periode 2031 bis 2050 die Auswirkungen der europäischen Klimapolitik auf die Produktion der energieintensiven und energieextensiven Sektoren deutlich stärker sind als die Auswirkungen der Klimaveränderungen (Bachner et al., 2013).

Anpassung an den Klimawandel

Im Bereich Wasserkraft ergeben sich v. a. veränderte Abflüsse sowie Zunahmen in der Variabilität der Abflüsse. Diesen Entwicklungen könnte mit Anpassungsmaßnahmen wie etwa Veränderungen an Turbinen oder an Staubecken begegnet werden, um entweder die energetischen Erträge zu sichern oder gar zu erhöhen (vgl. Bachner et al., 2013 basierend auf Spindler, 2013).

Während Wasserkraftwerke mit steigendem Abfluss durch Überlauf umgehen können, können manche Windturbinen bei Starkwindereignissen nicht betrieben werden. Diesem Problem kann durch Klimawandelanpassung in Form von eines Turbineneinsatzes mit vertikalen anstelle von horizontalen Achsen begegnet werden (vgl. Bachner et al., 2013 basierend auf Spindler, 2013).

Im Bereich Solarenergie, insbesondere Photovoltaik, ergeben sich laufende Effizienzverbesserungen, die es auch erlau-

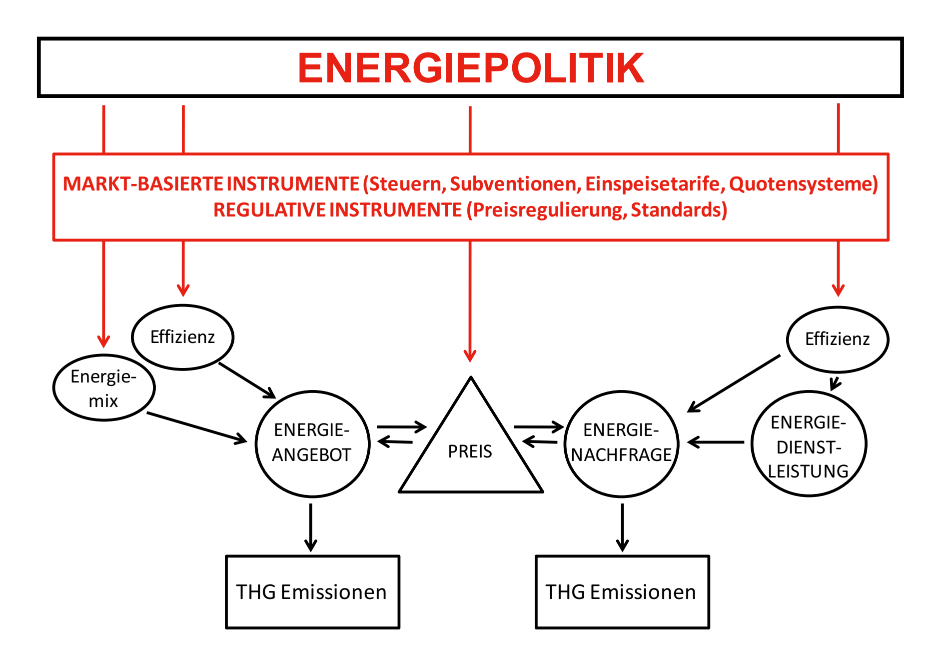


Abbildung 3.22 Zusammenhänge zwischen Energiesystem und energiepolitischen Instrumenten. Quelle: Adaptiert von Nakicenovic et al. (2012)

Figure 3.22 Relation between the energy system and energy policy instruments. Source: Adapted from Nakicenovic et al. (2012)

ben, mit veränderten Einstrahlungen umzugehen. In diesem Bereich sind daher keine gesonderten Anpassungsmaßnahmen erforderlich. Anders sieht es jedoch mit höherer Temperatur aus, die für Photovoltaikpanele ebenfalls eine wichtige Rolle spielen. Hier sind insbesondere Technologien zur Kühlung sowie zur Ummantelung denkbar (vgl. Bachner et al., 2013 basierend auf Spindler, 2013).

Eine Zunahme des Kühlbedarfs in Wohn- und Bürogebäuden kann zu Fehlanpassung führen, wenn diese mit den derzeit üblichen strombetriebenen Kühlgeräten erfolgt. Gebäudeseitige Effizienzmaßnahmen wie Abschattung oder auch Maßnahmen wie Nachtkühlung können die Kühllasten erheblich reduzieren. Auch die Erhöhung der Effizienz von elektrisch betriebenen Geräten in Gebäuden führt aufgrund der reduzierten inneren Einträge deutlich zur Verringerung der erforderlichen Kühlenergie. Insbesondere muss bei der thermischen Gebäudesanierung verstärkt auf Sommertauglichkeit geachtet werden, da sonst die Gefahr besteht, dass die Wärmedämmung zwar zu deutlich reduziertem Heizenergiebedarf, allerdings unter Umständen zu erhöhtem Kühlenergiebedarf führt. Dies kann durch die oben genannten Maßnahmen verhindert werden. Neben der vorrangigen Reduktion des Kühlenergiebedarfs existieren auch versorgungsseitige klimaneutralere Alternativen. Preisler (2012) nennt z. B. Verwendung von Systemen zur solaren Kühlung. Auch stellt PV eine geeignete Anpassungsmaßnahme dar. Aufgrund der nicht exakten Gleichzeitigkeit (Kühllastspitzen treten etwas verzögert gegenüber der PV-Spitze ein) sind allerdings auch mit hohen PV-Anteilen entsprechende Speicher- bzw. Spitzenlastkraftwerke zur Abdeckung der Kühllastspitzen erforderlich (Kranzl et al., 2013b).

Synergien zwischen Klimaschutz und Anpassung

Während manche Anpassungsmaßnahmen wie verstärktes Kühlen negative Auswirkungen für den Klimaschutz aufweisen. bieten sich einige synergetische Maßnahmen an, die eine gleichzeitige Klimaschutz- und Anpassungswirkung erzielen (z. B. passive Maßnahmen zur Reduktion der Kühllast von Gebäuden, Reduktion innerer Lasten, Photovoltaik als Kapazitätsbeitrag im Sommer). Das Verhältnis von Anpassungs- und Klimaschutzmaßnahmen wurde ausführlich in Band 3, Kapitel 1 dargestellt und wird daher hier nicht mehr weiter diskutiert.

3.1.9 Energiepolitische Instrumente

Die Begrenzung des Klimawandels erfordert eine grundlegende Restrukturierung bestehender Energiesysteme. In diesem Kapitel wird beschrieben, welche energiepolitischen Instrumente es gibt, um die beschriebenen Klimaschutzmaßnahmen umzusetzen.

Ausgangspunkt für die Diskussion energiepolitischer Instrumente ist ein gewisses Marktversagen. Die ideale Vorstellung eines Marktes, ist, dass dieser das gesellschaftliche optimale Gleichgewicht aus Angebot und Nachfrage herbeiführt und dass der Preis für die Energiedienstleistungen, den die EndverbraucherInnen bezahlen, letztendlich auch den gesellschaftlichen Grenzkosten entspricht.

Ist dies nicht der Fall, weil z. B. negative Umwelteffekte nicht hinreichend berücksichtigt werden, so ist dies ein Argument für Markteingriffe. Abbildung 3.22 gibt einen Überblick über mögliche energiepolitische Instrumente um in den oben beschriebenen Kategorien (Energiedienstleistung, Energienachfrage und Energieaufbringung) die Einflussfaktoren zu verändern.

Für die Reduktion von THG-Emissionen im Energiebereich ist nach Abschnitt 3.1.1 der Einsatz energiepolitischer Instrumente in den folgenden Bereichen erforderlich:

- Reduktion der nachgefragten Energiedienstleistungen S (z. B. der Wegstrecken)
- Steigerung der Energieeffizienz η
- Erhöhung des Anteils erneuerbarer, emissionsarmer Primärenergieträger → Reduktion von f_{THG}

Die Kosten erneuerbarer Energiebereitstellung und hocheffizienter Energiebereitstellungstechnologien liegen derzeit noch oftmals über jenen konventioneller Technologien. Zudem bestehen z. T. im Bereich erneuerbarer Energien nicht-monetäre Barrieren (z. B. Informationsdefizite), die einer breiten Diffusion entgegenstehen. Daher besteht das Erfordernis, diese Technologien in der Investitions- und Betriebsphase zu fördern, um Investitionen anzureizen. Bei der Gestaltung der entsprechenden Fördersysteme gilt es, verschiedene Ziele zu erreichen bzw. in Ausgleich zu bringen. Eines dieser Ziele betrifft die Effektivität der Instrumente, d. h. ihre Wirksamkeit in Bezug auf die Steigerung der Energieeffizienz bzw. auf die Steigerung des Einsatzes erneuerbarer Energieträger. Ein weiteres Ziel ist es, die Instrumente ökonomisch effizient zu gestalten, also die volkswirtschaftlichen Kosten für die Erreichung der energiepolitischen Ziele zu minimieren.

Die ökonomische Theorie schlägt die Nutzung marktbasierter Instrumente als effektiv und ökonomisch effizient vor, um eine Transformation in Richtung eines nachhaltigen Energiesystems einzuleiten (d. h. um THG-Emissionen zu begrenzen sowie den Anteil erneuerbarer Energien und die Energieeffizienz zu erhöhen). Zu den marktbasierten Instrumenten zählen einerseits preisbasierte Instrumente, wie Steuern oder Einspeistarife und andererseits mengenbasierte Instrumente wie z. B. Emissionshandel oder Tendering-Systeme.

Preisbasierte Instrumente fixieren den Preis für THG-Emissionen und erneuerbare Energien, während der Anteil erneuerbarer Energien oder die realisierte Emissionsminderung durch den Markt bestimmt wird. Im Gegensatz dazu legen mengenbasierte Instrumente das Emissionsniveau oder den Anteil erneuerbarer Energie fest, während der Preis am Markt gebildet wird (siehe z. B. De Jonghe et al., 2009).

Nach der ökonomischen Theorie würden die Ergebnisse der beiden Instrumente identisch sein als Resultat der Annahme einer Welt ohne externe Effekte und Unsicherheit, d. h. einer Welt mit perfekter Information, rationalen AkteurInnen und ohne Marktversagen (siehe z. B. McKibbin und Wilcoxen, 2002; Hepburn, 2006).

Unter realen Bedingungen herrschen jedoch zahlreiche Unsicherheiten, wie z. B. Unsicherheit in Bezug auf das optimale Emissionsreduktionsziel, Unsicherheit und / oder asymmetrische Informationen bezüglich technologischer Optionen oder Unsicherheit über die künftige Entwicklung von Energiepreisen, Innovation und Wirtschaftswachstum (z. B. Kettner et al., 2011). Politische EntscheidungsträgerInnen müssen daher zwischen Unsicherheit bezüglich quantitativer Ziele und Unsicherheit bezüglich des Preisniveaus wählen (siehe Murray et al., 2009).

Im Folgenden werden die zentralen energiepolitischen Zielsetzungen auf EU-Ebene zusammenfassend beschrieben, da diese den Rahmen für die österreichische Politik vorgeben. Danach werden die wichtigsten Instrumente zur Förderung erneuerbarer Energien und zur Steigerung der Energieeffizienz in Österreich diskutiert.

Europäische Rahmenbedingungen

Die EU-Richtlinie zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen („RES-Richtlinie", 2009/28/EC: EU, 2009) sieht für 2020 europaweit einen Anteil von 20 % erneuerbarer Energie am Bruttoendenergieverbrauch vor. Es handelt sich somit um ein relatives Ziel, das durch einen Ausbau erneuerbarer Energien (in den Bereichen Wärme / Kälte, Elektrizität, Transport) sowie durch Energieeinsparungen erreicht werden kann. Für die einzelnen EU-Mitgliedsstaaten wurden innerhalb einer EU-internen Lastenverteilung nationale Ziele festgelegt, die jedoch nicht auf den Potentialen für den kosteneffizienten Ausbau EE basierten. In der RES-Richtlinie vorgesehene Kooperationsmechanismen (Box 3.2) sollen daher einen Ausbau EE dort ermöglichen, wo sie am billigsten sind. Durch die Nutzung der Kooperationsmechanismen wird eine Anrechnung von in anderen Staaten produzierter EE für nationale EE („RES")-Ziele ermöglicht. Österreich hat innerhalb der EU-internen Lastenverteilung einem Ziel von 34 % erneuerbarer Energie am Bruttoendenergieverbrauch zugestimmt. Ein weiteres EU-Ziel besteht in der Beseitigung von Barrieren für eine rasche Diffusion EET etwa durch die Vereinfachung administrativer Verfahren oder durch eine Verbesserung des Netzzugangs.

Richtlinie 2009/28 stellt es den Mitgliedsstaaten frei, welche EET sie forcieren bzw. welche energiepolitischen Instrumente

Box 3.2: RES-Kooperationsmechanismen
Box 3.2: RES cooperation mechanism

Die RES-Richtlinie sieht folgende Kooperationsmechanismen vor (Tuerk et al., 2012):

1. Statistischer Transfer (engl. „Statistical Transfer"): Der statistische (nicht physische) Transfer von erneuerbaren(„RES")-Anteilen zwischen Mitgliedsstaaten zur Zielerreichung des Käuferlandes.
2. Gemeinsame Projekte (engl. "Joint Projects"): Projekte zweier oder mehrerer EU-Mitgliedstaaten, bzw. auch mit Drittstaaten, wobei mit finanzieller Unterstützung des Käuferlandes im Verkäuferland erneuerbare Energieprojekte umgesetzt werden.
3. Gemeinsame Förderregelungen (engl. „Joint Support Schemes"): Die Errichtung gemeinsamer RES-Förderregime zwischen EU-Mitgliedsstaaten.

Für Österreich ist derzeit keine Nutzung der Kooperationsmechanismen vorgesehen (BMLFUW, 2010). Dennoch könnte Österreich im Fall einer Zielübererreichung RES-Anteile an andere EU-Staaten mit Hilfe des Statistischen Transfers verkaufen. Ebenso könnte die Republik Investitionen anderer Länder in Österreich im Rahmen von Gemeinsamen Projekten zulassen. Dies würde zwar keinen unmittelbaren Vorteil für Österreich bis 2020 bedeuten (abgesehen von eventuell positiven heimischen Wertschöpfungseffekten), könnte jedoch die Startposition Österreichs für ein RES-Ziel nach 2020 durch den weiteren Ausbau erneuerbarer Energien frühzeitig verbessern. Während statistische Transfers den Vorteil der kurzfristigeren Nutz. B.arkeit aufweisen, würden gemeinsame Projekte eine längerfristige Verpflichtung zum Transfer von RES-Anteilen mit sich bringen. Gemeinsame Projekte sollten daher nur in Erwägung gezogen werden, wenn sich eine klare Übererreichung über den Zeitraum des Transfers abzeichnet bzw. wenn die Kosteneffizienz eines weiteren Ausbaus für die österreichische Zielerreichung nicht gefährdet wird (Tuerk et al., 2012).

sie dafür einsetzen. Im Bereich der Förderung von Elektrizität aus EET sind beispielsweise Einspeistarife, Einspeisprämien und Quotenverpflichtungssysteme mit handelbaren grünen Zertifikaten (sowie Kombinationen davon) die am häufigsten angewandten Förderinstrumente in der EU (Ragwitz et al., 2011; Kettner et al., 2009). Einspeistarife für erneuerbare Elektrizität werden in Österreich, Bulgarien, Zypern, Frankreich, Griechenland, Ungarn, Irland, Lettland, Litauen, Portugal und der Slowakei eingesetzt (Ragwitz et al., 2011). In Dänemark und den Niederlanden werden Einspeisprämien verwendet. Die Tschechische Republik, Estland, Slowenien und Spanien setzen auf eine Kombination von Einspeistarifen und Einspeisprämien. Belgien, Italien, Polen, Rumänien, Schweden und das Vereinigte Königreich fördern erneuerbare Elektrizitätserzeugung durch Quotenverpflichtungssysteme (Ragwitz et al., 2011). Quotenverpflichtungssysteme werden häufig mit Einspeistarifen für bestimmte Technologien kombiniert. Tenderverfahren, steuerliche Anreize und Investitionszuschüsse sind von eher untergeordneter Bedeutung.

Neben einer Steigerung des Anteils erneuerbarer Energieträger hat sich die EU das Ziel gesetzt, die Energieeffizienz bis zum Jahr 2020 um 20 % im Vergleich zu einem Referenzszenario zu steigern (EU, 2012) zur Energieeffizienz enthält zahlreiche Energieeffizienzaktivitäten, die von den Mitgliedstaaten umgesetzt werden sollen bzw. müssen. Zur Erreichung der vorgegebenen Effizienzziele können Mitgliedsstaaten so genannte „Energieeffizienzverpflichtungen" einführen. Energieversorgungsunternehmen oder Energieverteilungsunternehmen können darin verpflichtet werden, dafür zu sorgen, dass in der Periode 2014 bis 2020 jährlich mindestens 1,5 % ihres durchschnittlichen jährlichen Endenergieabsatzes eingespart wird. Zudem sieht die Energieeffizienzrichtlinie vor, dass Politiken und Strategien zum Ausbau effizienter Kraft-Wärme-Kopplung sowie Wärme- und Kälteversorgung entwickelt und umgesetzt werden. Auch ein Einspeisvorrang von KWK-Strom kann festgelegt werden, solange dieser die vorrangige Einspeisung von Strom aus EE nicht negativ beeinflusst.

Auch das seit 2005 bestehende europäische Emissionshandelssystem beeinflusst die Rahmenbedingungen für die Erzeugung von Elektrizität und Fernwärme maßgeblich. Anlagen für die Bereitstellung von Elektrizität und Fernwärme do-

minieren das EU-EHS; in den ersten beiden Handelsphasen entfielen rund 60 % der EU-weiten Allokation auf diesen Sektor (Kettner, 2012). Sowohl in der Pilotphase (2005 / 2007) als auch in der zweiten Handelsphase wies alleine der Sektor Elektrizität und Fernwärme ein bindendes Emissionscap auf, d. h. nur in diesem Sektor überstiegen die Emissionen im Durchschnitt die Allokation. In der ersten Handelsphase überstiegen die Emissionen aus der Bereitstellung von Elektrizität und Fernwärme die sektorale Allokation um 4,9 %, in den ersten vier Jahren der zweiten Handelsperiode lagen die Emissionen 18,5 % über der Allokation. Für die anderen Emissionshandelssektoren lag die Allokation in beiden Handelsperioden jeweils deutlich über den Emissionen (Kettner, 2012).

Unterschiede zwischen der Zuteilung von Zertifikaten an die einzelnen Sektoren sind vorwiegend durch Wettbewerbsüberlegungen motiviert (siehe z. B. Kolshus und Torvanger, 2005; Ellerman et al., 2007): Sektoren, die nicht dem internationalen Wettbewerb ausgesetzt sind (z. B. Elektrizität und Fernwärme), erhalten generell eine geringere Zuteilung als Sektoren, die im internationalen Wettbewerb stehen (z. B. Eisen- und Stahlindustrie, Zellstoff- und Papierindustrie). Für die Elektrizitätserzeugung spielten auch die relativ hohen Emissionsreduktionspotentiale bei der stringenteren Allokation eine Rolle.

Diese Überlegungen flossen in die aktuelle Emissionshandels-Richtlinie ein (Richtlinie 2009/29/EG), in der unterschiedliche Allokationsverfahren für durch „Carbon Leakage" unterschiedlich betroffene Sektoren definiert werden. Für den Elektrizitätssektor gelten demnach ab der dritten Emissionshandelsphase striktere Allokationsregeln, d. h. die meisten Anlagen aus diesem Sektor können Emissionszertifikate ausschließlich im Rahmen von Auktionierungen erwerben (mit Ausnahme von hocheffizienten KWK sowie Kraftwerken in manchen neuen EU-Mitgliedsstaaten), während in anderen Sektoren Zertifikate gratis auf Basis von EU-weiten Benchmarks zugeteilt werden.

Energiepolitische Instrumente in Österreich

In diesem Abschnitt werden die zentralen energiepolitischen Instrumente im Bereich der Elektrizitätsbereitstellung sowie allgemeine Instrumente zur von Wärme und Kälte aus erneuerbaren Energieträgern beschrieben. Instrumente, die einzelne andere Sektoren betreffen (z. B. Wohnbauförderung im Gebäudebereich), finden sich in den jeweiligen Kapiteln.

Elektrizität

Im Folgenden werden die zentralen Förderinstrumente zur Förderung der Erhöhung des Anteils EET sowie zur Verbesserung der Energieeffizienz in der Elektrizitätsbereitstellung dargestellt: Einspeistarife und Investitionszuschüsse im Rahmen des Ökostromgesetzes, die Förderung von KWK-Technologien im Rahmen des KWK-Gesetzes sowie der privilegierte Netzzugang von Elektrizität aus EET und KWK im Rahmen des Elektrizitätswirtschafts- und -organisationsgesetz.

Forcierung erneuerbarer Energieträger

Seit 2002 wird die Förderung der Stromerzeugung aus EET im Ökostromgesetz (ÖSG) und den entsprechenden Novellen geregelt[13]. Im Rahmen des ÖSG können folgende Technologien durch Einspeistarife gefördert werden (ÖSG, 2012):

- Windkraftanlagen
- Photovoltaikanlagen (sofern deren Leistung 5 kW_{peak}, nicht aber 500 kW_{peak} übersteigt)
- Kleinwasserkraftanlagen mit einer Engpassleistung von bis zu 2 MW
- Geothermieanlagen (sofern sie einen Gesamtwirkungsgrad von mindestens 60 % erreichen)
- Anlagen auf Basis von Biomasse und Biogas (sofern sie einen Gesamtwirkungsgrad von mindestens 60 % erreichen)[14]

In der Ökostromverordnung (ÖSVO) werden die Einspeistarife für EET festgelegt, wobei sowohl zwischen Energieträgern als auch zwischen Anlagengrößen differenziert wird. Für ressourcenabhängige Technologien (feste und flüssige Biomasse, Biogas) werden die Einspeistarife für eine Periode von 15 Jahren gewährt[15], für die übrigen Technologien beträgt die Förderdauer 13 Jahre (ÖSG, 2012; ÖSVO, 2012). Wenn der Marktpreis für Strom höher als die Einspeisvergütung ist, können die Betreiber von Ökostromanlagen die Elektrizität zu Marktpreisen einspeisen (ÖSG, 2012).

[13] Mit dem Ökostromgesetz 2002 wurden die Rahmenbedingungen für die Förderung von Ökostromanlagen in Österreich vereinheitlicht; zuvor wurde die Förderung der Stromerzeugung aus EET auf Länderebene geregelt.

[14] Bei Hybrid- und Mischfeuerungsanlagen kann eine Förderung für den Anteil der eingesetzten EET gewährt werden. Anlagen auf Basis von Biomasse und Biogas erhalten zudem einen „KWK-Bonus", wenn sie bestimmte Effizienzkriterien erfüllen (ÖSG, 2012).

[15] Gemäß ÖSG (2012) erhalten Anlagen, die auf Biomasse oder Biogas basieren, nach Ablauf der Einspeistarife für fünf weitere Jahre einen geförderten Abnahmepreis, der jedoch unter den Einspeistarifen liegt.

Zur Förderung von Anlagen auf Basis von Ablauge sowie für Wasserkraft (von 2-10 MW) sieht das ÖSG Investitionszuschüsse anstelle von Einspeistarifen vor; Kleinwasserkraftanlagen mit einer Engpassleistung unter 2 MW können zwischen dem Einspeistarif und einer Investitionsförderung wählen. PV-Anlagen mit einer Leistung von bis zu 5 kW_{peak} können eine Investitionsförderung vom österreichischen Klima- und Energiefonds erhalten.

Bei der Ökostromförderung handelt es sich um keine klassische öffentliche Förderung; die Förderung wird von den KonsumentInnen aufgebracht. Die Rahmenbedingungen für die Förderung von Ökostrom waren insbesondere in den letzten Jahren zahlreichen Änderungen unterworfen. So gab es seit 2002 sieben unterschiedliche Ökostromverordnungen[16] und zahlreiche Novellen des Ökostromgesetzes.

Im Rahmen der zahlreichen Förderungsnovellen kam es zwischen 2006 und 2008 durch die Verkürzung der Tariflaufzeiten sowie durch die Deckelung des Förderbudgets im Rahmen des ÖSG 2006[17] zu einem Ausbaustopp von Ökostromanlagen (Umweltbundesamt, 2013). Durch den unrentablen Einspeistarif für Windenergieanlagen stagnierte insbesondere der Ausbau von Windenergie in Österreich in der Periode von 2006 bis 2009.

Einspeistarife zeigen in der Praxis generell eine höhere Effektivität als andere Förderinstrumente (z. B. Haas et al., 2011b). Für Österreich folgern Kettner et al. (2009) jedoch, dass eine Überprüfung der Tarife zu bestimmten Zeitpunkten die Sicherheit über die regulatorischen Rahmenbedingungen erhöhen bzw. deren allfällige Änderungen für Neuanlagen ermöglichen und somit auch zur Stabilität und Kontinuität beitragen würde. Neben der Möglichkeit, damit auf exogene Faktoren und Entwicklungen reagieren zu können, würde dies auch die Möglichkeit einer regelmäßigen Evaluierung des Systems bieten.

[16] BGBl. II Nr. 508/2002, BGBl. II Nr. 401/2006, BGBl. II Nr. 59/2008, BGBl. II Nr. 53/2009, BGBl. II Nr. 42/2010, BGBl. II Nr. 25/2011, BGBl. II Nr. 471/2011, BGBl. II Nr. 307/2012.

[17] Die Ökostromgesetznovelle 2006 (BGBl. I Nr. 105/2006) legte ein maximales zusätzliches jährliches Unterstützungsvolumen von 17 Mio. € fest, das wie folgt auf die unterschiedlichen Energieträger aufgeteilt wurde: 30 % für Ökostromanlagen auf Basis von fester Biomasse oder Abfall mit hohem biogenen Anteil, 30 % für Anlagen auf Basis von Biogas, 30 % für Windkraftanlagen und 10 % für PV-Anlagen und weitere Ökostromanlagen. Mit der zweiten Ökostromgesetznovelle 2008 (BGBl. I Nr. 114/2008) wurden das Unterstützungsvolumen auf 21 Mio. €/Jahr erhöht und die technologiespezifische Differenzierung des Unterstützungsvolumen vereinfacht: Für PV wurde eine Obergrenze von 2,1 Mio. € festgelegt, für die übrigen Technologien entfiel die Differenzierung. Im Rahmen des Ökostromgesetzes 2012 wurde das zusätzliche jährliche Unterstützungsvolumen auf 50 Mio. € erhöht und es erfolgte erneut eine stärkere technologiespezifische Differenzierung.

Erhöhung der Energieeffizienz

Im Rahmen des KWK-Gesetzes wird die Förderung von bestehenden und revitalisierten sowie neuen KWK-Anlagen durch Unterstützungstarife bzw. Investitionszuschüsse geregelt. Voraussetzung für die Förderung von KWK-Anlagen ist, dass im Vergleich zur getrennten Erzeugung von Elektrizität und Fernwärme eine signifikante Reduktion des Primärenergieeinsatzes sowie der CO_2-Emissionen erzielt wird. Revitalisierte KWK-Anlagen müssen zudem der öffentlichen Fernwärmeversorgung dienen.

Für Neuanlagen, deren Antrag bis zum 30. September 2012 eingebracht wurde und die bis Ende 2014 in Betrieb gehen, erfolgt die Förderung in Form von Investitionszuschüssen, wobei maximal 10 % des unmittelbar für die Errichtung der KWK-Anlage erforderlichen Investitionsvolumens gefördert werden und der spezifische Investitionszuschuss je kW mit der Größe der Anlage abnimmt.

Die Unterstützung bestehender KWK-Anlagen endete mit dem 31. Dezember 2008; die Unterstützung modernisierter KWK-Anlagen endete mit dem 31. Dezember 2010.

Das geplante Energieeffizienzgesetz hat umfassende Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz zum Ziel, u. a. die Unterstützung von Energieeffizienzmaßnahmen in Unternehmen sowie die Anforderung an Energielieferanten, Energieeffizienzmaßnahmen bei sich oder ihren EndkundInnen zu erreichen.

Beim Ausbau von KWK gilt es, das Zusammenspiel von Angebot und Nachfrage zu betrachten; in diesem Zusammenhang können sich kleine Strukturen als vorteilhaft erweisen, um die erzeugte Wärme möglichst effizient zu nutzen.

Privilegierter Netzzugang von Elektrizität aus EET und KWK

Das Elektrizitätswirtschafts- und -organisationsgesetz (ElWOG) definiert den vorrangigen Netzzugang von Elektrizität aus EET und KWK-Anlagen in Fällen von Engpässen bei den vorhandenen Leitungskapazitäten. Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Instrumenten handelt es sich hierbei um ein regulatorisches Instrument.

Wärme

Umweltförderung Inland (UFI)

Grundlage der in Österreich gewährten Umweltförderungen ist das im Jahr 1993 in Kraft getretene Umweltförderungsgesetz. In Österreich stellt die Umweltförderung im Inland ein zentrales Instrument der Umweltpolitik dar, mit dem Anreize für die Umsetzung umwelt- und klimafreundlicher Techno-

logien im betrieblichen Bereich gesetzt werden (Kletzang-Slamanig und Steininger 2010 Es wird von der Kommunalkredit Public Consulting GmbH abgewickelt. Mittels der Förderung sollen Kostennachteile umwelt- und klimafreundlicher Technologien im Vergleich zu konventionellen Technologien ausgeglichen werden. Im Laufe der 1990er Jahre zeigte sich eine zunehmende Fokussierung der Förderung auf klimarelevante Maßnahmen (Kletzang-Slamanig und Steininger, 2010). Dazu gehören insbesondere die Nutzung erneuerbarer Energien bzw. Energiesparmaßnahmen. Im Bereich CO_2-armer Energieträger werden derzeit die folgenden Technologien gefördert: Holzheizungen zur Eigenversorgung; Nahwärmeversorgung auf Basis von EET; Fernwärmeanschluss; Wärmepumpen; thermische Solaranlagen; solare Großanlagen; Stromerzeugung in Insellage auf Basis von EET; Herstellung biogener Brenn- und Treibstoffe; energetische Nutzung biogener Roh- und Reststoffe; Erdgas-Kraft-Wärme-Kopplung für Betriebe; landwirtschaftliche Biomasse.

Im Bereich Energiesparen fördert die UFI neben thermischer Gebäudesanierung unter anderem die Klimatisierung und Kühlung von Betrieben mit Energie aus Abwärme / EET, bzw. in Form von Energienutzung aus Produktionsprozessen. Die Förderung erfolgt in Form von nicht rückzahlbaren Investitionszuschüssen in Höhe von ca. 20–30 % der umweltrelevanten Investitionskosten. Die im Jahr 2011 genehmigten Förderungsanträge mit einem Förderungsbarwert von 350,5 Mio. € lösten ein umweltrelevantes Investitionsvolumen von 1 992 Mio. € aus (BMLFUW, 2012). Im Jahr 2011 wurden die meisten Projekte bei den Förderschwerpunkten Biomasse (21 %), Solaranlagen (15 %) sowie bei den betrieblichen Energiesparmaßnahmen (13 %) bewilligt (BMLFUW, 2012).

Die Zahl der eingereichten Projekte überstieg in den letzten Jahren das Fördervolumen, der Rückstau beträgt schon jetzt ein Jahresbudget des Jahres 2011. Gleichzeitig würde der zugesagte Rahmen der Umweltförderung im Inland für das Jahr 2013 um ca. 25 Mio. € gekürzt (Bundesfinanzgesetz, 2013), was angesichts der zu erreichenden Energie- und Klimaziele für das Jahr 2020 als sehr kritisch zu sehen ist.

Förderungen des Klima und Energiefonds

Der Klima- und Energiefonds wurde 2007 durch die Bundesregierung ins Leben gerufen, um die Umsetzung ihrer Klimastrategie zu unterstützen – kurz, mittel- und langfristig. Eigentümer ist die Republik Österreich, vertreten durch das Lebensministerium und das Infrastrukturministerium. Die Strategien der österreichischen Bundesregierung in den Bereichen Forschung und Technologie, Klimaschutz sowie Energie liefern die wesentlichen Grundlagen, die in den Programmen des Klima- und Energiefonds ihren Niederschlag finden.

Das Jahresbudget für 2013 beträgt 140,6 Mio. € (Jahresprogramm 2013 des Klima und Energiefonds). Genauso wie bei der UFI wurde das Budget für den Klima- und Energiefonds im Vergleich zu 2012 gekürzt (Bundesfinanzgesetz, 2013). Im Bereich erneuerbarer Wärme fördert der Klima- und Energiefonds die Installation von Wärmeerzeugungsanlagen, die EET nutzen, mit einem Budget von 7 Mio. € im Jahr 2013.

Einführung von THG-spezifischen Steuern:

Die Einführung von Energiesteuern, die jährlich kontinuierlich steigen, wird in den meisten POLICY-Szenarien als zentrales Instrument eingestuft. Das effektivste Instrument zur Reduktion der THG-Emissionen ist eine Steuer auf CO_2-Äq. Sie stellt gleichzeitig für die Forcierung aller drei Handlungskategorien –Umstieg auf THG-arme Energieträger, Steigerung der Energieeffizienz und Reduktion des Energiedienstleistungsbedarfs – entsprechende Anreize bereit:

- Zunächst werden in einem Wettbewerb von Energieträgern CO_2-Äq.-ärmere, z. B. jene, die auf EET basieren, relativ kostengünstiger. Eine Steuer auf CO_2-Äq. führt beispielsweise dazu, dass es nicht mehr notwendig ist, z. B. Biofuels, Wasserstoff oder Strom für E-Fahrzeuge zu subventionieren sondern die (möglichen) Umweltvorteile dieser Kraftstoffe resultieren aus der niedrigeren Besteuerung
- Mittelfristig ist dies natürlich auch ein Anreiz in energieeffizientere Geräte, Autos, Gebäude und Industrieanlagen zu investieren
- Wenn die Energiepreise durch eine Steuer steigen, ist dies weiters ein direkter Anreiz, den Energieverbrauch und bei gleich bleibendem Wirkungsgrad auch den Energiedienstleistungsbedarf zu senken. Vor allem würden z. B. auch Stand-by-Verluste durch Verhaltensänderungen sinken.

3.1.10 Kernaussagen

Die wichtigsten Erkenntnisse aus dieser Bewertung der energiepolitischen Situation Österreichs lauten:

Die in Europa für 2020 festgesetzten energie- und klimapolitischen Zielsetzungen und noch mehr die für 2050 artikulierten Ansprüche und Erfordernisse, um eine globale Temperatursteigerung um 2 °C nicht zu überschreiten, können sicher nicht alleine durch Substitution von Energieträgern bzw. dem

Einsatz von singulären Effizienztechnologien erreicht werden. Vielmehr ist dafür ein grundlegender gesellschaftlicher Wandel erforderlich, im Rahmen dessen auch das Energiesystem mittelfristig umzugestalten ist. Die wichtigsten Schlussfolgerungen aus dieser Bewertung der energiepolitischen Situation Österreichs lauten:

Österreich im internationalen Vergleich

Im internationalen Vergleich ist das Energiesystems Österreichs wie folgt einzuschätzen:

- In Bezug auf den Anteil EET ist Österreich sowohl bei der PE als auch bei der Stromerzeugung positiv einzuschätzen
- Auch in Bezug auf die spezifischen THG-Emissionen ist Österreich im internationalen Vergleich sehr gut zu bewerten. Auch der Trend ist positiv zu bewerten. Österreich konnte den Wert von 2,13 t CO_2-Äq. / toe im Jahr 2000 bis 2010 auf 1,93 weiter reduzieren.
- Eher negativ ist Österreichs Energiesystem im Vergleich der Serviceeffizienz – Wirtschaftsleistung pro Einheit Energieverbrauch – einzustufen. Zwar liegt Österreich im internationalen Vergleich absolut bewertet sehr gut (vgl. Abbildung 3.12) der Trend ist allerdings sehr bedenklich. So war Österreich im Vergleich mit 9 080 € / toe im Jahr 2000 unter den verglichenen Ländern an der Spitze, im Jahr 2010 ist es mit 8 630€ / toe hinter DEU, ITA und JPN zurückgefallen. In dieser Darstellung war Österreich überhaupt das einzige Land, das sich im Zeitraum von 2000 bis 2010 verschlechtert hat.

Energiemix der Primärenergieaufbringung: Option erneuerbare Energiequellen

- Das bis 2050 erschließbare Potenzial an EET in Österreich beträgt den verschieden Studien zufolge zwischen 750 und 1 300 PJ.
- Biomasse nimmt unter den EET eine spezifische Stellung ein und wird auch in Zukunft eine wichtige Rolle bei der Substitution fossiler Energieträger spielen müssen. Die primärenergetischen Potenziale sind in Österreich sind allerdings bereits weitgehend erschlossen. Zukünftige Maßnahmen sollten darauf abzielen, die hinsichtlich ökonomischer und ökologischer Kriterien effizientesten Nutzungspfade zu forcieren.
- Beim weiteren Ausbau der energetischen Biomassenutzung ist der Flächen- bzw. Rohstoffbedarf für Nahrungsmittelproduktion und stoffliche Biomassenutzung zu berücksichtigen (zumal eine Substitution fossiler Rohstoffe auch bei stofflichen Produkten erforderlich ist und beispielsweise der forcierte Einsatz biogener Baustoffe mitunter mit signifikanten THG-Einsparungen verbunden ist).

Optionen im Bereich der Stromerzeugung

- Im Bereich der Stromaufbringung kann – je nach Szenario – bis 2050 bis zu 100 % Deckung durch EET erreicht werden. Allerdings erscheint aus heutiger Sicht aus Praktikabilitäts- / Kostengründen die Beibehaltung eines Restanteils von 5 bis 10 % Erdgas sinnvoll.
- In Bezug auf Infrastruktur sind die deutlichsten Veränderungen im Strombereich notwendig, wobei hierbei nahezu alle Subbereiche (Erzeugung, Netz, Speicherung und Verbrauch) betroffen sind. Diese Strukturanpassungen erscheinen aber auch bei maßvoller Weiterentwicklung der energiepolitischen Rahmenbedingungen durchaus erreichbar. Der steigende Anteil EET im Erzeugungsbereich, Smart Grids vor allem auf Verteilnetzebene, neue Stromspeichertechnologien und -kapazitäten sowie Smart Meters bei den VerbraucherInnen werden die bestehenden Strukturen signifikant verändern und eine weitgehend CO_2-arme Stromversorgung ermöglichen.
- Die bedeutendste Veränderung, die im Bereich der Stromversorgung derzeit stattfindet, ist der Markteintritt der Photovoltaik in Deutschland. Diese wird – in den nächsten Monaten und Jahren – das gesamte Marktsystem – auch in Österreich – fundamental verändern, da temporär sehr große Strommengen aus diesen Anlagen produziert werden, die Eigenverbrauchsanteile erhöht werden und Stromspeicher sowie Smart Grids eine wesentlich bedeutendere Rolle im Stromsystem spielen werden als derzeit (Haas, 2013).

Option Reduktion Heizenergiebedarf

- Im Bereich der Heizenergieversorgung von Wohngebäuden könnten mit weiter ambitionierten Politiken die THG-Emissionen bis 2050 am drastischsten gesenkt werden. Am wichtigsten sind hierfür eine qualitativ hochwertige thermische Sanierung des Bestands und die optimale Einbindung der Nutzung EET.
- Bei Neubauten wurde in den letzten Jahren ein beträchtlicher technologischer Fortschritt realisiert. In den nächsten Jahren sollte dieser Trend weiter forciert werden bzw. die erreichten Kennwerte jener Gebäude mit dem geringsten Energiebedarf bzw. THG-Emissionen sollten der Festlegung von Standards für künftige Neubauten dienen. Im

Sinne des mit der europäischen Gebäuderichtlinie (Neufassung) eingeschlagenen Weges ist eine sehr ambitionierte Festlegung von Neubaustandards erforderlich, um langfristige Klimaschutzziele zu erreichen.

- Unter diesen Rahmenbedingungen kann bis 2050 auf Basis von EET eine Abdeckung von etwa 70 % des Wärmebedarfs erreicht werden, wobei hier ein breites Portfolio aus Biomasse, Solarthermie, Geothermie und der Nutzung von Umgebungswärme zum Einsatz käme.

Optionen im Bereich des Stromverbrauchs

- Der Stromverbrauch wird ohne gravierende politische Eingriffe weiter deutlich ansteigen. Zwar wird es durch effizientere Technologien bei bestehenden Anwendungen und der Beleuchtung zu Einsparungen kommen, vor allem durch die weitere Verbreitung neuer stromkonsumierender Anwendungsbereiche bei gleichbleibend niedrigen (realen) Niveaus der Strompreise wird der Gesamtstromverbrauch zumindest moderat weiter steigen. Das ist das Ergebnis praktisch aller berücksichtigten Szenarien, ausgenommen jener, die eine Reduktion des Stromverbrauchs explizit vorgegeben haben.

Optionen im Bereich der Mobilität

- Im Verkehrsbereich kann nur ein umfassendes Portfolio aus Maßnahmen in den Kernbereichen dringend notwendige Veränderungen einleiten: A) Fiskalische Instrumente; B) Raumplanung und gesetzliche Maßnahmen; C) Technologische Innovationen bei konventionellen und alternativen Antrieben; D) Soft tools (Details zu verkehrspolitischen Maßnahmen siehe „Verkehr" Abschnitt 3.2).

Wichtigste energiepolitische Instrumente

Insgesamt sind die wichtigsten energiepolitischen Instrumente zur Reduktion der THG-Emissionen: CO_2-basierte Steuern, Verschärfung der thermischen Gebäudestandards, verschärfte Standards für Elektrogeräte und effiziente weitere (fiskalische) Förderung EET. Von zentraler Bedeutung sind hier Anreize für die Marktintegration, sowohl bei Strom als auch bei Wärme und Mobilität.

3.2 Verkehr
3.2 Transport

In diesem Kapitel analysieren wir die wichtigsten, für Österreich relevanten, internationalen und nationalen THG-spezifischen Entwicklungen im Verkehrsbereich und leiten davon notwendige verkehrs- und energiepolitische Maßnahmen ab, um letztendlich die mögliche Bandbreite der Entwicklungen aufzuzeigen, in dem wir ein BAU- und ein ambitioniertes POLICY-Szenario vergleichen. Das Kapitel ist wie folgt aufgebaut:

Nach einer kurzen Beschreibung der Motivation in Abschnitt 3.2.1 und der wichtigsten grundsätzlichen Zusammenhänge zwischen Verkehr, Energie und THG-Emissionen in Abschnitt 3.2.2 werden in Abschnitt 3.2.3. die wichtigsten Fakten in Bezug auf derzeitige Trends des Energieverbrauchs und Transportvolumens beschrieben. Um die österreichspezifischen Entwicklungen in einem entsprechenden internationalen Kontext präsentieren zu können, werden dazu zunächst die internationalen, welt- bzw. europaweiten Perspektiven erörtert und dann jene für Österreich. Abschnitt 3.2.4 gibt einen Überblick über verschiedene mögliche Einflussparameter bzw. Treiber (Einflussparameter wie BIP, Preise oder technische Effizienz), die als Gründe für diese Entwicklungen angesehen werden können. Darauf aufbauend werden in Abschnitt 3.2.5 die wichtigsten Indikatoren dokumentiert. Abschnitt 3.2.6 gibt darauf aufbauend einen Überblick zu möglichen Ansätzen zu Adaptation und Mitigation. Politischen Maßnahmen welche in den folgenden Unterkapiteln detaillierter erörtert werden.

3.2.1 Welt- und europaweite Fakten zu Energieverbrauch und CO_2-Emissionen des Verkehrs

In diesem Kapitel dokumentieren wir die wichtigsten Merkmale und Indikatoren der historischen Entwicklung des Verkehrs aus nachfrage- und energieseitiger Sicht weltweit und in Europa. Nachfrageseitig werden Personen- und Güterverkehr getrennt analysiert.

Welt

In den letzten Dekaden ist der Energieverbrauch im Verkehr sowohl in den OECD- als auch in den Nicht-OECD-Ländern substanziell gestiegen (vgl. Abbildung 3.23). Ältere Datenreihen zeigen, dass der Energieverbrauch und damit auch die CO_2-Emissionen im Verkehr seit 1850 kontinuierlich zuge-

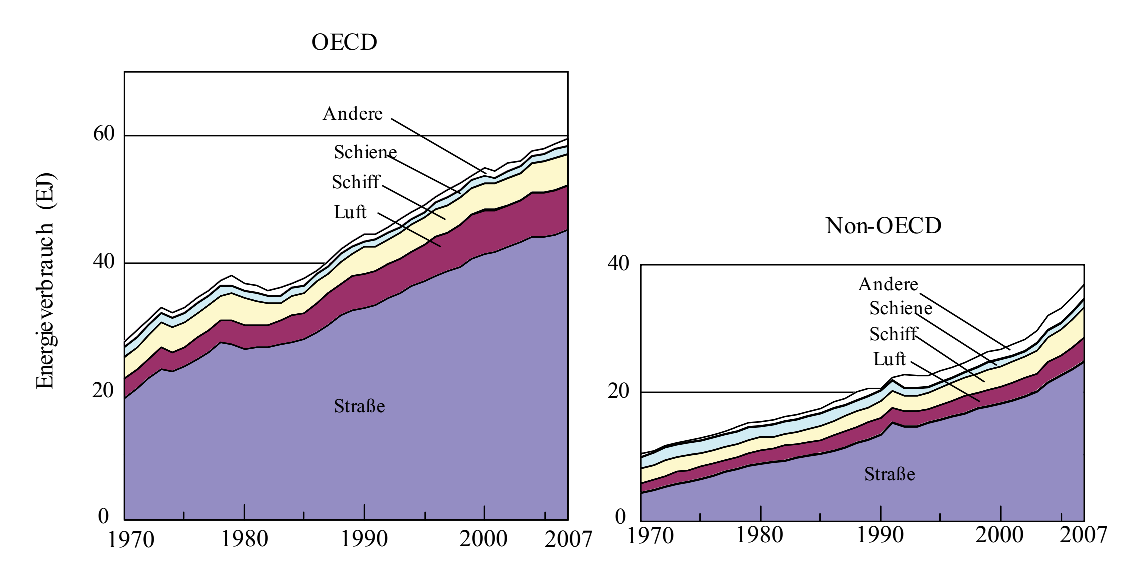


Abbildung 3.23 Energieverbrauch im Verkehr in OECD- und Nicht-OECD-Ländern nach Verkehrsmittel (in „Andere" sind Pipelines und nicht weiter spezifizierte Verkehrsmittel zusammen gefasst). Quelle: GEA (2012)

Figure 3.23 Energy consumption in transport in OECD and non-OECD countries decomposited in transport modes ("others" resumes pipelines and non specified transport modes). Source: GEA (2012)

nommen haben (GEA, 2012; Molitor et al., 1997). In den Entwicklungs- und Schwellenländern wurde dieser Anstieg in den letzten Jahren durch die rapide Urbanisierung und Motorisierung vor allem durch die Entwicklung in China beschleunigt.

Eine einzige fossile Ressource – Erdöl – stellt am Ende des ersten Jahrzehnts unseres Jahrhunderts 95 % der gesamten im Verkehrsbereich genutzten Energie bereit. Diese Abhängigkeit bewirkt zwei globale Probleme: die langfristige Versorgungssicherheit und die dramatisch anwachsenden THG-Emissionen (vgl. Stern, 2007).

Im Jahr 2007 hat der globale Verkehrssektor 6.6 Gt CO_2-Emissionen produziert, das entspricht 23 % der weltweiten THG-Emissionen. 73 % davon hat der Straßenverkehr (SNF, LNF und PKW zusammen[18]) verursacht (vgl. Abbildung 3.24).

Steigende Fahrleistungen (Fahrzeug-Kilometer), sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr, sind die am stärksten treibende Kraft in Bezug auf Anstieg des weltweiten Ölverbrauchs und der THG-Emissionen in den OECD-Ländern (IEA, 2010).

Europa

Der Verkehr verursacht in der EU bereits ein Viertel der THG-Emissionen und ist somit der einzige Sektor mit deutlich steigendem Trend (vgl. Abbildung 3.25). Allein der motorisierte Straßenverkehr (Personen- und Güterverkehr, PKW, LNF und SNF) verursacht 24 % der THG-Emissionen in der EU (vgl. Abbildung 3.26).

Die Treiber („driver") im Energieverbrauch im Verkehr sind die Zunahme der Fahrleistungen im Straßenverkehr und die technologischen Verbesserungen durch effizientere Antriebe im motorisierten Verkehr generell. Die Wachstumsraten der Fahrleistungen sind bisher höher gewesen als die Steigerung der Effizienz, wodurch der Energieverbrauch zugenommen hat.

Energieverbrauch und CO_2-Emissionen des Verkehrs in Österreich

In diesem Abschnitt werden die Entwicklung der Verkehrsleistungen im Personen- und Güterverkehr sowie des Energieverbrauchs und der CO_2-Emissionen in Österreich über die letzten Dekaden kurz umrissen.

Personenverkehr

Bei der Darstellung des Personenverkehrs wird in der Regel nach zurückgelegten Wegen pro Zeiteinheit (üblicherweise Wege pro Werktag) und nach Verkehrsleistung in Personenkilometer (dem Produkt aus Weg und Distanz) unterschieden. Die Zahl der zurückgelegten Wege liegt in Österreich im Durchschnitt bei 3,7 Wegen / Werktag (Herry et al., 2007)

[18] SNF: Schwere Nutzfahrzeuge (Lkw > 3,5t Gesamtmasse), LNF: Leichte Nutzfahrzeuge (Fahrzeuge zum Gütertransport / Lieferverkehr, < 3,5t Gesamtmasse), Pkw: Personenkraftwagen

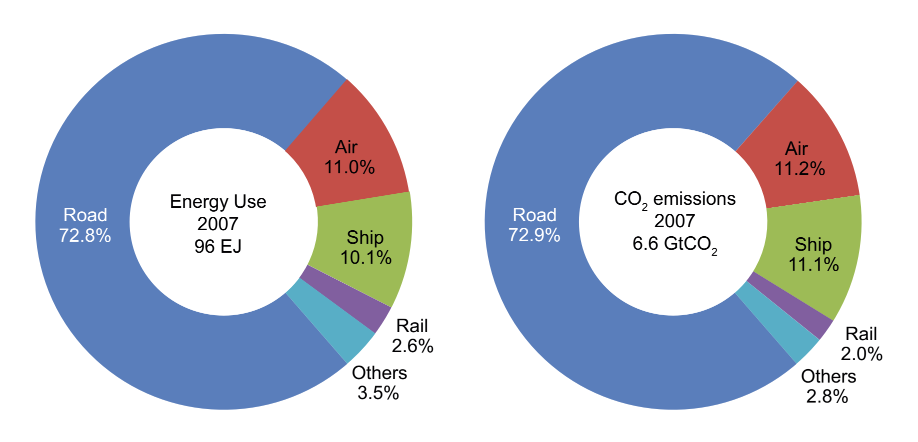


Abbildung 3.24 Anteil der einzelnen Verkehrsmittel am globalen Energieverbrauch und den CO_2-Emissionen im Verkehrsbereich 2007. Quelle: GEA (2012)

Figure 3.24 Share of the global energy consumption and CO_2-emissions of the differerent transport modes in the sector transport in 2007 Source: GEA (2012)

und variiert je nach Untersuchungsgebiet und Erhebungsjahr zwischen 3,4 und 3,9 Wegen / Werktag (Herry et al., 2007).

Für eine energetische Betrachtung, ist jedoch die Darstellung der Verkehrsleistung von größerer Relevanz. Die Darstellung der Verkehrsleistung ist territorial, d. h. die Verkehrsleistung ist auf die Strecken(-anteile) innerhalb von Österreich bezogen. Bei Fahrten über die Staatsgrenze werden nur die Distanzen vom Ausgangs- oder Endpunkt in Österreich bis zur Grenze bzw. bei Transitfahrten zwischen den beiden Grenzübergangspunkten berücksichtigt.

Zwischen 1990 und 2010 steigt die jährliche Verkehrsleistung in Personenkilometer (Pkm) von 79 Mrd. Pkm (ohne Flugverkehr) auf insgesamt 101 Mrd. Pkm pro Jahr (ohne Flugverkehr) Der Großteil des Wachstums ist dem motorisierten Verkehr (IV und ÖV) zuzurechnen. Der nicht motorisierte Verkehr (NMV = FußgängerInnen- und Radverkehr) nimmt hingegen sowohl bei der Zahl der Wege als auch in den Personenkilometern etwas ab. Bei den Personenkilometern hingegen spielt der NMV naturgemäß eine geringe Rolle; der Anteil des NMV ist systembedingt niedrig (vgl. Abbildung 3.27). Mit der Zunahme der Verkehrsleistung einhergehend ist, neben der Zunahme der EinwohnerInnen in Österreich, auch eine Zunahme der „Systemgeschwindigkeit“, d. h. der Durchschnittsgeschwindigkeit aller Verkehrsmittel fest zu stellen. Daher ist auch nur eine unwesentliche Veränderung der durchschnittlichen werktäglichen Mobilitätszeit in der historischen Entwicklung zu beobachten. Jüngst kann jedoch eine tendenziell geringe Zunahme der durchschnittlichen, werktäglichen Mobilitätszeit beobachtet werden (Sammer und Herry, 1998; Herry et al., 2007; Herry et al, 2011). Diese Entwicklung ist auch in anderen Ländern und Regionen weltweit zu beobachten (Zumkeller et al., 2011; Millard-Ball und Schipper, 2010). Insofern wird auch bereits über einen „peak travel“ berichtet (Millard-Ball und Schipper, 2010).

Wichtige Treiber („driver“) der Verkehrsentwicklung sind neben der Anzahl an EinwohnerInnen, die Bereitstellung der

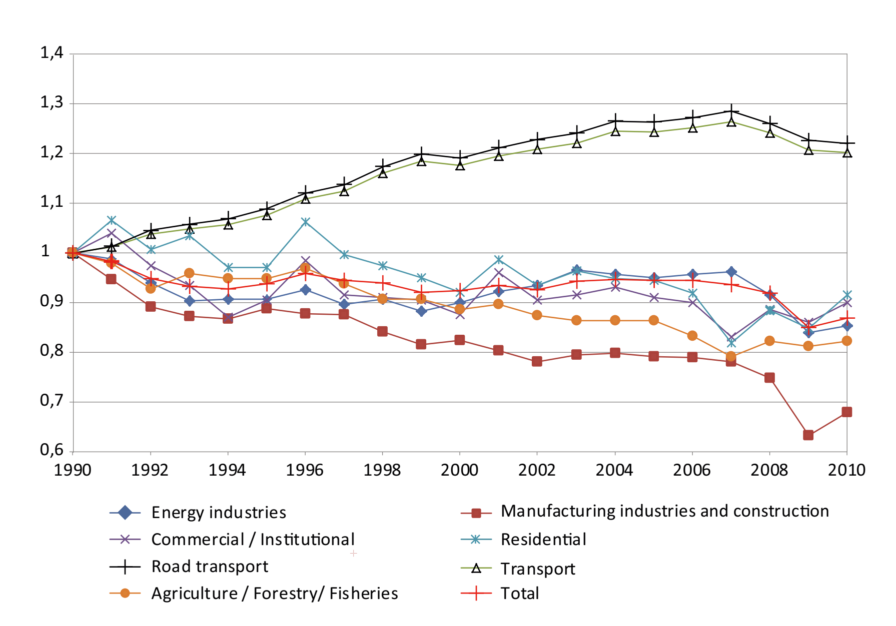


Abbildung 3.25 Entwicklung der THG-Emissionen in EU-27 in verschiedenen Sektoren. Quelle: EU (2013)

Figure 3.25 Development of the GHG-emissions in EU-27 decomposited in the different sectots. Source: EU (2013)

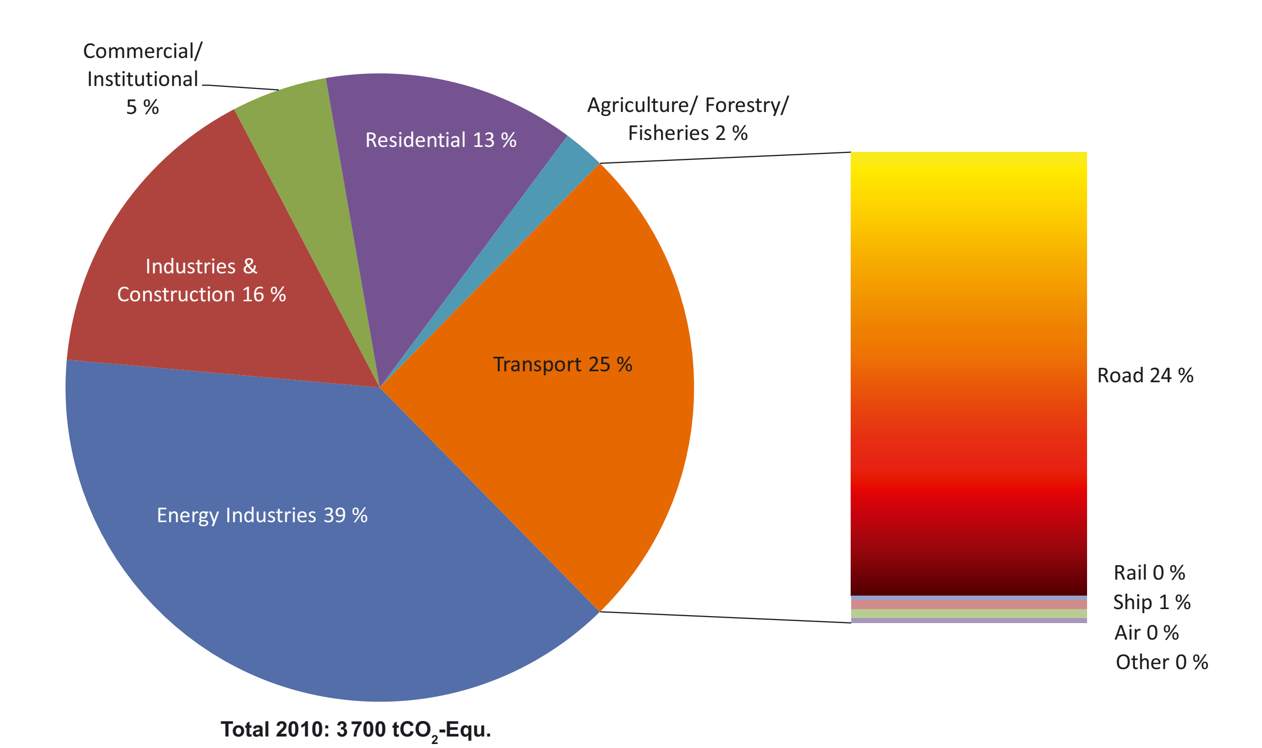


Abbildung 3.26 Anteile an THG-Emissionen in den EU-27 nach Sektor im Jahr 2010 sowie Anteile am Verkehr (nur Inlandsverkehr); Bei Eisenbahn nur direkte CO_2-Emissionen aus Dieseltraktion; ihr Anteil liegt unter 0,5 %. Quelle: EU (2013)

Figure 3.26 Share of the GHG emissions in EU-27 divided into the sectors and in transport modes (only inland); Only direct CO_2 emissions in rail considered, the share of rail is below 0,5 %. Source: EU (2013)

Infrastruktur (hochrangiges Straßen- und Schienennetz, letzteres mit einem entsprechendem Zugangebot) und die Zahl der PKW (Motorisierungsrate). Entsprechend der Entwicklung des hochrangigen Straßennetzes (Autobahn-, Schnellstraßen- und Bundesstraßennetz) und der Anzahl an gemeldeten PKW in Österreich, wächst auch die Verkehrsleistung im Autoverkehr und damit verbunden der Energieverbrauch und die CO_2-Emissionen. Maßnahmen im ÖV (zusätzliche Zugangebote, bzw. Reduktion derselben) oder gravierende Preisänderungen der Kraftstoffe führen zu Verlagerungen zwischen den Verkehrsmitteln. Zwei Beispiele zeigen dies etwa beim 1996 beobachteten Rückgang des ÖV durch eine signifikante Reduktion des Angebots im Eisenbahnverkehr (Reduktion der Zugkilometer nach Einführung des sogenannten NAT 91 („Neuer Austrotakt", mit dem eine durchgehende Vertaktung des Zugsangebotes auf Basis eines Stundentaktes am gesamten Bahnnetz der ÖBB erfolgte) und bei den 2007 / 2008 beobachteten Zunahme im ÖV durch die kurzfristig deutliche Preissteigerung des Kraftstoffes in Form steigender Benzin- und Dieselpreise (siehe Abschnitt 3.2.2.).

Güterverkehr

Ebenso wie beim Personenverkehr wird im Güterverkehr nach Aufkommen, ausgedrückt in transportierter Masse in Tonnen, und der Verkehrsleistung nach Tonnenkilometer, dem Produkt aus Masse und Distanz, unterschieden.

Die transportierte Masse weist ein weniger starkes Wachstum auf als die Verkehrsleistung, d. h. die Güter werden zunehmend über größere Distanzen transportiert. Dabei ist auch zu berücksichtigen, dass knapp die Hälfte der Güter der Gütergruppe der Baustoffe / Baumaterialien zuzuordnen ist (Statistik Austria, 2012), die in der Regel nur über kurze Distanzen transportiert werden.

Zwischen 1990 und 2010 steigt die jährliche Verkehrsleistung von 32 Mrd. tkm auf insgesamt 61 Mrd. tkm pro Jahr an (vgl. Abbildung 3.28); damit ist diese deutlich stärker ausgeprägt als das Wachstum des Personenverkehrs im gleichen Zeitraum Ein wesentlicher Treiber im Güterverkehr ist die wirtschaftliche Entwicklung (ausgedrückt im BIP); die Verkehrsleistung im Güterverkehr entwickelt sich nahezu parallel zum BIP, wobei der Güterverkehr in den vergangenen Jahrzehnten selbst im Vergleich zum BIP überproportional zugenommen hat. (European Commission, 2012; vgl. auch Abbildung 3.28).

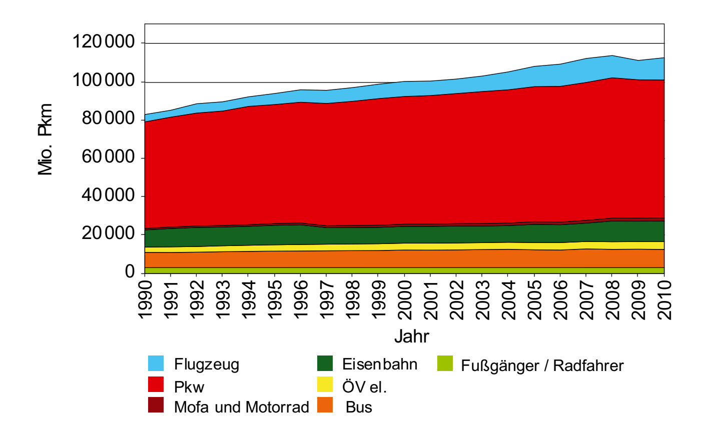


Abbildung 3.27 Historische Entwicklung der Verkehrsleistung (in Personenkilometer) nach Verkehrsmittel 1990 bis 2010 in Österreich. Quelle: Umweltbundesamt (2011b)

Figure 3.27 Historical development of the transport performance (in passenger kilometres) divided into transport modes from 1990 to 2010 in Austria. Source: Umweltbundesamt (2011b)

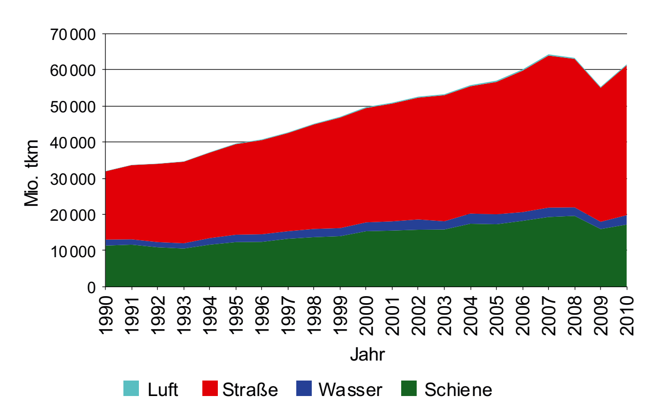


Abbildung 3.28 Historische Entwicklung der Verkehrsleistung (Tonnenkilometer) nach Verkehrsmittel 1950 bis 2010 in Österreich. Quelle: Umweltbundesamt (2011b)

Figure 3.28 Historical development of the transport performance (in ton kilometres) divided into transport modes from 1990 to 2010 in Austria. Source: Umweltbundesamt (2011b)

Energie und CO_2-Emissionen

Der Energieverbrauch und direkt damit verbunden die CO_2-Emissionen im Verkehr hängen direkt mit der Fahrleistung (in Fahrzeugkilometer) zusammen. Interessant ist die korrespondierende Berechnung der CO_2-Emissionen des Verkehrs in Österreich nach den einzelnen Nutzergruppen. Der Löwenanteil entfällt auf den Straßenverkehr: nur ein kleiner Anteil entfällt auf die Eisenbahn und die Schifffahrt, die mit anderen Verbrauchern wie landwirtschaftliche Fahrzeuge, unter der Nutzergruppe „Off road" zusammengefasst sind. Abbildung 3.29 (vgl. Kernaussagen) zeigt die korrespondierende Entwicklung der THG-Emissionen im Verkehr in Österreich von 1970 bis 2010 nach Energieträgern.

Der mit der Verkehrsentwicklung korrespondierende Energieverbrauch in Österreich zeigt innerhalb von 40 Jahren nahezu eine Vervierfachung von ca. 100 PJ 1970 auf ca. 380 PJ 2010. Ebenso wie bei der Analyse der historischen Daten für Europa bzw. weltweit basiert der Energieverbrauch im Verkehr in Österreich im Wesentlichen auf Erdöl; der Anteil des Erdöls liegt je nach Jahr zwischen 90 und 95 %.

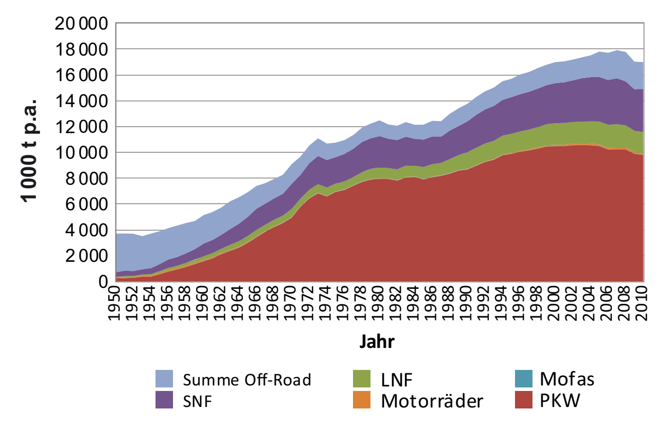


Abbildung 3.29 [3] Historische Entwicklung der CO_2-Emissionen im Verkehr von 1950 bis 2010 in Österreich. Quelle: Hausberger und Schwingshackl (2011)

Figure 3.29 Historical development of CO_2-emissions in transport from 1950 to 2010 in Austria. Source: Hausberger und Schwingshackl (2011)

[3] LNF: Leichte Nutzfahrzeuge (Lieferwagen und Lkw <3,5 t Gesamtmasse); SNF: Schwere Nutzfahrzeuge (Lkw >3,5 t Gesamtmasse und Busse); Off-Road: Baumaschinen, Landwirtschaftliche Maschinen, Rasenmäher etc.

Fahrzeugbestand, Größe der Fahrzeuge und Kraftstoffintensität in Österreich

Beeindruckend ist in der Entwicklung des österreichischen Fahrzeugbestands der kontinuierliche Anstieg – auch im Jahr der Wirtschaftskrise 2009 – sowie nach Kraftstoffkategorien unterschieden, der markante Wechsel zu Dieselfahrzeugen. Die steuerliche Begünstigung des Diesels in Österreich hat dazu geführt, dass der Anteil der Dieselfahrzeugen an der Pkw-Flotte signifikant stieg. Erst 2007/2008 konnte aufgrund der Angleichung der Preise zwischen Diesel und Benzin eine Trendumkehr beobachtet werden. Der Anteil der Dieselfahrzeuge hat abgenommen, da der Preisunterschied zu Benzin nur mehr marginal war und der höhere Anschaffungspreis eines Diesel-PKW, insbesondere bei PKWs mit Motoren mit kleinem Hubraum, durch die nunmehr ange-

glicheneren Betriebskosten nicht mehr aufgefangen werden kann.

3.2.2 Wirkungsmechanismen im Personenverkehr

Entwicklung der Kraftstoffintensität von Pkw

Seit 1980 sinkt die durchschnittliche Kraftstoffintensität des Autobestands in allen Ländern kontinuierlich (Ajanovic und Haas, 2012d). Am stärksten gesunken ist die Kraftstoffintensität in der Zeit hoher Ölpreise zwischen 1980 und 1990, vor allem in den USA, wo in dieser Periode auch eine Reihe von „fuel economy improvement programs" implementiert wurden, z. B. CAFE in Kalifornien. Aber nach dem Verfall der Ölpreise 1986 hat sich mit einiger Verzögerung ab ca. 1990, die Effizienzsteigerung in den meisten Ländern deutlich verlangsamt.

Im Jahr 2010 hatten die PKW-Flotten der Europäischen Länder eine „in-use" Kraftstoffintensität, die zwischen 6,0-9,3 l / 100 km lag, jene Japans und der USA lagen zwischen 10,5–11,4 l / 100 km.

Der Effizienzgewinn im Kraftstoffverbrauch neuer PKW lag Tests zufolge in Europa zwischen 1980 und 2010 in einer Bandbreite von 18–30 %. Diese Verbesserungen waren im Wesentlichen eine Folge von freiwilligen Vereinbarungen der Fahrzeugindustrie, die Kraftstoffintensität der Fahrzeuge zu verringern. Derzeitige Ziele der EU und Japans sind jedoch wesentlich schärfer und weisen eine größere Verbindlichkeit auf. Ab 2012 gelten in der EU für PKWs Grenzwerte für CO_2-Emissionen von 130 g CO_2 / 100 km, wobei eine Einführungsphase bis 2015 vereinbart wurde: 2012 müssen 65 % der PKW-Flotte diese Grenzwerte erreichen, ab 2015 100 % (EC, 2011c). Bis zum Jahr 2020 soll dieser Wert auf 95 g CO_2 / 100 km sinken.[19] Japan hat als Grenzwert für PKWs einen CO_2 Grenzwert von 125 g CO_2 / 100 km festgesetzt.

Zusammengefasst ist festzustellen, dass in den letzten Dekaden deutliche Verbesserungen in der Effizienz beim Kraftstoffverbrauch neuer Fahrzeuge erreicht wurden. Allerdings wurden diese zu einem großen Anteil durch größere, leistungsstärkere und schwerere Fahrzeuge kompensiert.

Seit etwa 1990 ist die durchschnittliche Kraftstoffintensität von Dieselfahrzeugen um ca. 20 % niedriger als jene von Benzinfahrzeugen. Nach einer Phase der Stagnation in der Kraftstoffintensität während der Dekade 1990 bis 2000, die auch durch eine Zunahme der durchschnittlichen Motorenleistung wie auch der Masse der Fahrzeuge charakterisiert ist (vgl. Abschnitt 3.2.2), nimmt die Kraftstoffintensität seit 2000 kontinuierlich ab (Hausberger und Schwingshackl, 2011).

Entwicklung der Kraftstoff- und Servicepreise

Kraftstoffpreise können einen signifikanten Einfluss auf die Fahrleistung und die Kraftstoffintensität haben. Die Entwicklung des Preises der Energiedienstleistung Mobilität für PKWs im individuellen Straßenverkehr (Kraftstoffpreis mal Kraftstoffintensität bzw. Kosten für eine Strecke von 100 km dargestellt im Verhältnis 2 000 $ PPP / 100 km). Die Bandbreite der Preise für individuelle Mobilität variiert beträchtlich zwischen den einzelnen Ländern. Im Jahr 2010 war der Preis für 100 km Fahrleistung in den USA am niedrigsten und in Schweden am höchsten.

Zwischen 1985 und 1998 sind sowohl die Kraftstoff- als auch die Mobilitätspreise real leicht gesunken. Nach 1998 sind die Kraftstoffpreise real in vielen Ländern deutlich gestiegen, vor allem aufgrund der gestiegenen Rohölpreise und der Erhöhung der Kraftstoffsteuern, wie etwa in vielen europäischen Ländern z. B. in Deutschland oder UK. In den letzten Jahren stellen wir eine hohe Volatilität mit deutlich niedrigeren Preisen im Jahr der Wirtschaftskrise 2009 fest.

Der Einfluss gesteigerter Fahrleistung im Personenverkehr

Die Mobilität im motorisierten Individualverkehr ist in praktisch allen Ländern in den letzten Jahren gestiegen. Allerdings gibt es in Bezug auf die Fahrleistung pro Kopf in einzelnen OECD-Ländern eine beträchtliche Bandbreite zwischen 4 500 und 13 500 km pro Kopf Zwischen 1980 und 2010 gab es die größten Zuwächse bei der Fahrleistung in Italien mit 127 % und in Japan mit 101 %. Diese Steigerungen sind analog zum Motorisierungsgrad (PKW / 1 000 EinwohnerInnen). Zusätzlich spielt die räumliche Struktur im jeweils betrachtetem Land eine wichtige Rolle, sowie die daraus resultierende „Zwangsmobilität". Im Zusammenspiel mit einem hohen Motorisierungsgrad führt dies wie etwa am Beispiel USA zu einer hohen Fahrleistung pro Kopf.

Der Einfluss größerer Fahrzeuge (PKW)

Ein zentraler Grund dafür, dass sich die theoretische Effizienzsteigerung nicht in einer entsprechenden Reduktion der Kraft-

[19] Der Grenzwert von 95 g CO_2 / 100 km, der von 100 % der PKW-Flotte eingehalten werden muss, wurde später auf 2021 verschoben.

stoffintensität widerspiegelt, sind die beträchtlichen Zuwächse in der Leistung und in der Masse neuer Fahrzeuge speziell seit Mitte der 1990er Jahre. In praktisch allen Europäischen Ländern ist bis 2007 ein kontinuierlicher Anstieg zu erkennen, wobei in Schweden, Deutschland und Großbritannien die größten Fahrzeuge (in Leistung kW ausgedrückt) gekauft wurden. Die kleinsten Autos gibt es historisch in Portugal, Italien und Frankreich. Nach 2007 ist die durchschnittliche Leistung neuer Fahrzeuge in praktisch allen Ländern gesunken oder stagnierte (als Folge des raschen Anstiegs der Kraftstoffpreise 2007 bis 2008). Interessant ist auch, dass der absolute Anstieg in fast allen Ländern (mit Ausnahme Schwedens) mit ca. 30 kW zwischen 1990 und 2010 gleich war (vgl. Ajanovic et al., 2012b).

3.2.3 Trends und Entwicklungen im Verkehr bis 2030 und danach

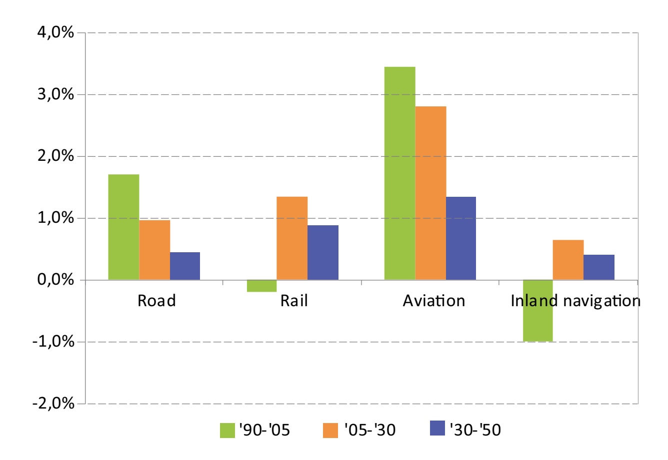
Basierend auf den in den vorigen Kapiteln beschriebenen Lösungsansätzen und dem in Abschnitt 3.2.7 ausgewählten Portfolio an Politiken werden in diesem Kapitel Szenarien verglichen, die zeigen, welche Entwicklungen in Abhängigkeit von verschiedenen Portfolios politischer Maßnahmen möglich sind.

Der Ausblick auf die Entwicklung des Personen- und Güterverkehrs bildet eine grundlegende Eingangsgröße für die Berechnungen des Energieverbrauchs und der Emissionen.

Verkehrsprognosen der Europäischen Kommission

Die Verkehrsprognosen der Europäischen Kommission geben von 2005 bis 2030 ein Wachstum der Verkehrsleistung im Personenverkehr von 34 % an. Im Güterverkehr wird von 2005 bis 2030 von einem Wachstum der Verkehrsleistung (tkm) von 40 % ausgegangen. Bis 2050 wird im Personenverkehr mit einem Zuwachs der Verkehrsleistung um 51 % gerechnet, im Güterverkehr mit einem solchen um 80 % (vgl. Abbildung 3.30) (EC, 2011c). Im Personenverkehr liegen die Prognosen über jenen der OECD (High Car Ownership – High GDP), im Güterverkehr sind sie niedriger als jene der OECD und unterliegen dem „Baseline“-Szenario (OECD / ITF, 2012).

Die Europäische Kommission geht von einer zunehmenden multi-modalen Mobilitäts- bzw. Transportkette aus; dennoch zeigen die Ergebnisse zwischen 1990 und 2050 nur eine geringe Veränderung im Modal Split (bezogen auf die Verkehrsleistung). Es kommt daher nicht zu einem Paradigmenwechsel: 2030 werden mit dem PKW nach wie vor 79 % der Personenverkehrsleistung abgewickelt; 2050 noch 76%. Der



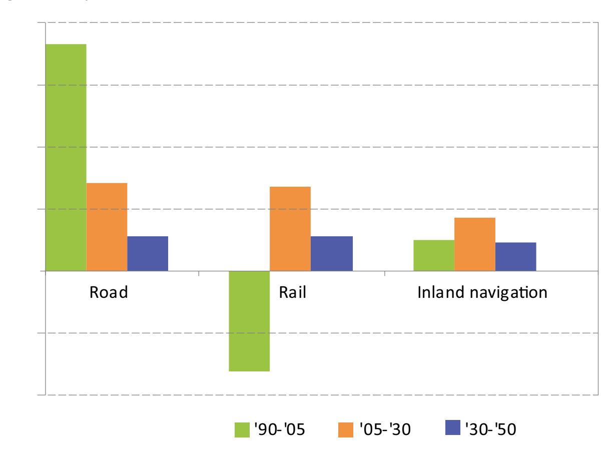


Abbildung 3.30 Durchschnittliche jährliche Wachstumsraten im Personen- und Güterverkehr (nach 2010 Prognosen; EU 27). Quelle: EC (2011a).

Figure 3.30 Average yearly growth rates in passenger- and freight transport (after 2010 forecast; EU 27). Source: EC (2011a)

Luftverkehr wird stark steigen und einen Anteil von 15 % an der Verkehrsleistung in 2050 erreichen. Hingegen wird für die Schiene nur ein moderater Anstieg um 8 % für 2030 und 2050 prognostiziert Analog zum Personenverkehr nimmt die Bedeutung des Straßengüterverkehrs nur marginal ab; der Anteil des Straßengüterverkehrs im Jahr 2030 liegt bei 73 % und verbleibt bis 2050 auf demselben Niveau (ohne Berücksichtigung der Seeschifffahrt; EC, 2011c).

Szenarien zur Verkehrsentwicklung in Österreich

Die Verkehrsleistung im Personen- und Güterverkehr Österreichs folgt dem bisherigen Trend und wird nach der vorliegenden Prognose in den nächsten 25 Jahren nochmals

deutlich steigen. Nachdem es sich bei der Verkehrsprognose 2025+ vom BMVIT derzeit um die aktuellste und fundierteste Prognose für Österreich handelt, wird nur diese herangezogen. Die Verkehrsprognose basiert auf der regionalisierten Bevölkerungsprognose der ÖROK und des regionalen Input Output Modell Österreich zur Modellierung des bilateralen Güterverkehrs sowie des Binnengüterverkehrs von WIFO und Joanneum Research (BMVIT, 2011a).

Personenverkehr

Die Verkehrsleistung im Personenverkehr steigt in Summe von 101 Mrd. Pkm in 2010 auf 137 Mrd. Pkm in 2030 (jeweils ohne Flugverkehr) – das entspricht einem Wachstum von 36 % im Vergleich zu 2010. Im gleichen Zeitraum steigen die Fahrzeugkilometer der Pkw (Fzg-km) um 48 % auf 90 Mrd. Fzg-km in 2030; dies ist eine Folge des sinkenden Besetzungsgrades der Pkw und des steigenden Motorisierungsgrades. Im ÖV wird für den Zeitraum von 2010 bis 2030 dagegen mit einer Zunahme der Verkehrsleistung (pkm) um 31 % gerechnet. Der nicht motorisierte Verkehr stagniert. Deutliche Zuwächse werden für den Luftverkehr erwartet: die Passagierzahl an den österreichischen Flughäfen wird sich gegenüber 2010 bis 2030 mehr als verdoppeln, die Verkehrsleistung wird um ca. 130 % steigen (BMVIT, 2011b).

Nachfragestrukturen im Verkehr werden wesentlich durch sozio-ökonomische Faktoren wie Bevölkerungsentwicklung, Raumentwicklung, Ausstattung der Haushalte mit Fahrzeugen, Wirtschaftswachstum oder Preise für Energie bestimmt. Für die Berechnung der zukünftigen Verkehrsleistung in Österreich bilden Prognosen zur Bevölkerungs- und Wirtschaftsentwicklung daher eine wichtige Basis.

Für Österreich prognostiziert die ÖROK bis zum Jahr 2030 einen Anstieg der Bevölkerungszahl auf rund 9,0 Mio. EinwohnerInnen. Auch die Wirtschaftsleistung erfährt trendgemäß eine Steigerung: Gegenüber dem langfristigen historischen Durchschnitt des Wirtschaftswachstums (1977 bis 2003: 2,6 %/Jahr) wird im Prognosezeitraum bis 2030 von einer etwas geringeren Rate von ca. 2 %/Jahr ausgegangen (ÖROK, 2010).

Der Motorisierungsgrad in Österreich wird für 2030 auf 675 PKW/1 000 EinwohnerInnen laut den Ergebnissen der Verkehrsprognose 2025+ anwachsen. Dies sind etwa 150 Fahrzeuge pro 1 000 EinwohnerInnen mehr als heute (BMVIT, 2011b).

Für 2050 geht das Umweltbundesamt von einer Zunahme der Fahrleistung von 61 Mrd. Fzg-km in 2005 (BMVIT, 2011b) auf 86,5 Mrd. Fzg-km in 2050 aus (vgl. Umweltbundesamt, 2010). Es wurden nur die Fahrleistungen prognostiziert (als Basis für die Schätzung der Anteile von Elektro-Fahrzeugen im Personenverkehr in 2050).

Güterverkehr

Die Verkehrsleistung im Güterverkehr wird bis 2030 um 42 % gegenüber 2010 auf 87 Mrd. tkm zunehmen und bleibt auch in Zukunft eng an die Wirtschaftsentwicklung gekoppelt. Für die zur Berechnung der Emissionen relevanten Fahrleistungen der LNF und SNF werden Steigerungsraten von 33 % bzw. 40 % erwartet (Umweltbundesamt, 2011b).

Aufgrund der zunehmenden internationalen Verflechtungen im Güterverkehr werden künftig allerdings unterschiedliche Entwicklungstendenzen bei den Verkehrsarten festzustellen sein. Während der Anteil des Binnenverkehrs an der Verkehrsleistung trotz Wachstum bei allen Verkehrsträgern im Straßengüterverkehr von 43 % auf 38 %, im Schienengüterverkehr von 23 % auf 18 % sinkt, steigt der Anteil des Ziel/Quellverkehrs im Schienengüterverkehr von 52 % auf 56 %. Im Straßengüterverkehr bleibt dieser Anteil in etwa konstant, während der Anteil des Transitverkehrs an der Gesamt-Verkehrsleistung von 28 % in 2006 auf 33 % in 2030 wächst (BMVIT, 2011c).

Die Verkehrsleistung bei der Binnenschifffahrt steigt parallel zum Wirtschaftswachstum jährlich um ca. 2 % von derzeit ca. 2,4 Mrd. tkm im Jahr 1990 auf ca. 3,9 Mrd. tkm im Jahr 2030. Ihr Marktanteil über alle Verkehrsarten steigt leicht von 4,3 % auf 4,8 % an.

3.2.4 Trends und Entwicklung der CO_2-Emissionen bis 2030 und danach

CO_2-Emissionen – Prognose der Europäischen Kommission

In der Wirkungsabschätzung zum Weißbuch Verkehr wird bei der „Policy Option 1", dem Basisszenario, das ausschließlich auf bereits beschlossenen Maßnahmen basiert, bis 2020 von einer Zunahme der CO_2-Emissionen von ca. 31 % gegenüber 1990 ausgegangen. Bis 2030 wird angenommen, dass die CO_2-Emissionen leicht zurück gehen (–7 % bezogen auf 2020; +24 % bezogen auf 1990); von 2030 bis 2050 ergaben die Modellberechnung eine Stagnation der CO_2-Emissionen (vgl. Tabelle 3.2). Die angegebenen Modellergebnisse beinhalten den Flugverkehr, jedoch nicht die internationale Seeschifffahrt (EC, 2011c). Für die Szenarien wurden strengere Regulierungen der Kraftstoffintensität (spezifische Verbräuche von Fahrzeugen), insbesondere von PKWs, der Einsatz von

Tabelle 3.2 Entwicklung der CO_2-Emissionen im Verkehrssektor bis 2050; Prozentuelle Veränderung der CO_2-Emissionen bezogen auf das Basisjahr 1990; Quelle: European Commission SEC, EC (2011b)

Table 3.2 Development of the CO_2 emissions in transport until 2050: growth rates of CO_2 emissions based on 1990. Source: European Commission SEC, EC (2011b)

Politische Maßnahmen	Errechnete CO_2-Emissionen 2030					
	2020		2030		2050	
Verglichen zu	1990	Politische Maßnahmen, 1	1990	Politische Maßnahmen, 1	1990	Politische Maßnahmen, 1
Politische Maßnahmen, 1	30,8%	0,0%	24,2%	0,0%	24,2%	0,0%

 Anmerkung: Berechnungen basieren auf PRIMES-TREMOVE

biogenen Kraftstoffen und eine weitere Elektrifizierung der Eisenbahn in Europa angenommen.

Alles in allem führen diese Annahmen zu einer Reduktion der CO_2-Emissionen im Personenverkehr und zu einer Zunahme der CO_2-Emissionen im Güterverkehr (vor allem durch den Straßengüterverkehr verursacht) und insgesamt zu einer annähernden Stagnation der CO_2-Emissionen ab 2030 (vgl. Abbildung 3.31).

Die Treiber („driver") der Emissionsentwicklung sind die Zunahme der Verkehrsleistung, das energieintensive Transportsystem und der hohe Anteil an fossiler Energie im Verkehr. Die Ergebnisse des Energieverbrauchs und der CO_2-Emissionen der verschiedenen Szenarien werden im Wesentlichen von der angenommenen Verbesserung des Wirkungsgrads, der Erhöhung des Biotreibstoffanteils im Straßenverkehr und der zusätzlichen Elektrifizierung von Bahnstrecken beeinflusst. Bis 2020 wird im Verkehr ein Anteil der EET von 10 % unterstellt, bis 2050 wird eine Zunahme auf 13 % angenommen. Der Vorschlag der Europäischen Kommission, den Anteil von Biokraftstoffen erster Generation auf maximal 5 % zu begrenzen, kann sich auf die Erreichung des „10 %-Ziels" auswirken (EK, 2013). Möglicherweise können andere Technologien (E-Mobilität, Biomethan, Biotreibstoffe zweiter Generation, Wasserstoff usw.) nicht ausreichend zur Zielerreichung im Jahr 2020 beitragen. In Bezug auf Österreich könnte dies von geringerer Bedeutung sein, da ein dominierender Anteil der elektrischen Energie im Verkehr (Eisenbahn, städtischer ÖV) aus erneuerbaren Quellen stammt.

Bis 2030 werden die CO_2-Emissionen des Verkehrs – inklusive Flugverkehr und Seeschifffahrt – knapp 40 % und bis 2050 etwa die Hälfte der gesamten CO_2-Emissionen betragen. Im Vergleich zu 2005 sinken die CO_2-Emissionen des Personenverkehrs bis 2050 um ca. 8 %, im Güterverkehr steigen sie um etwa 18 % (European Commission SEC, 2011b).

Während das Reduktionsziel der THG-Emissionen in der EU über alle Sektoren hinweg mit 80 % bis 2050 bezogen auf das Ausgangsjahr 1990 formuliert wurde, sind die Re-

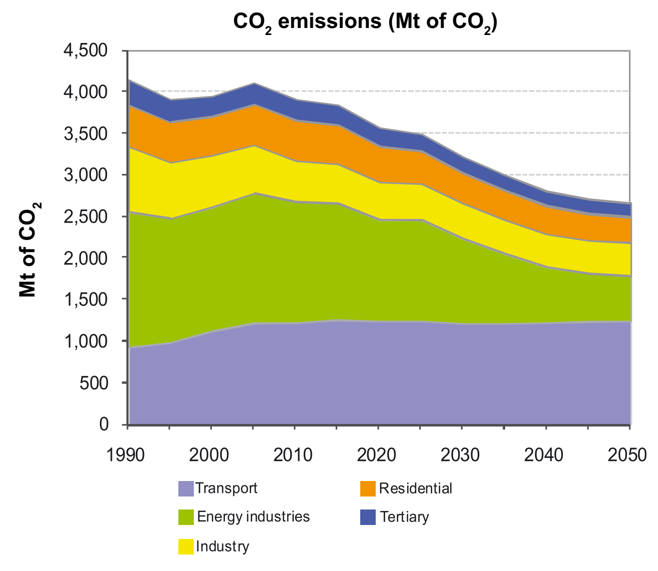


Abbildung 3.31 Entwicklung der direkten CO_2-Emissionen aller Sektoren bis 2050 (EU27) (Quelle: European Commission, EC (2011b)

Figure 3.31 Development of the direct CO_2 emissions all sectors until 2050 (EU-27). Source: European Commission, EC (2011)

duktionsziele heruntergebrochen auf die einzelnen Sektoren unterschiedlich: Im Verkehr wurde ein Reduktionsziel der THG-Emissionen in der EU bis 2050 von 60 % festgelegt. Die Szenarien zeigen eine andere Tendenz; im Vergleich zu 1990 würden die THG Emissionen im Verkehr bis 2050 noch etwas zunehmen.

CO_2-Emissionen – Prognosen für Österreich

In Österreich wurden mehrere Prognosen zur Entwicklung der CO_2-Emissionen mit unterschiedlichen Schwerpunkten und Horizonten erstellt. Einerseits wurden Prognosen mit dem Horizont 2020 und 2030 erstellt mit dem Ziel der Überprüfung der bereits beschlossenen Maßnahmen („with existing measures" – WEM) sowie zusätzlicher Maßnahmen („with

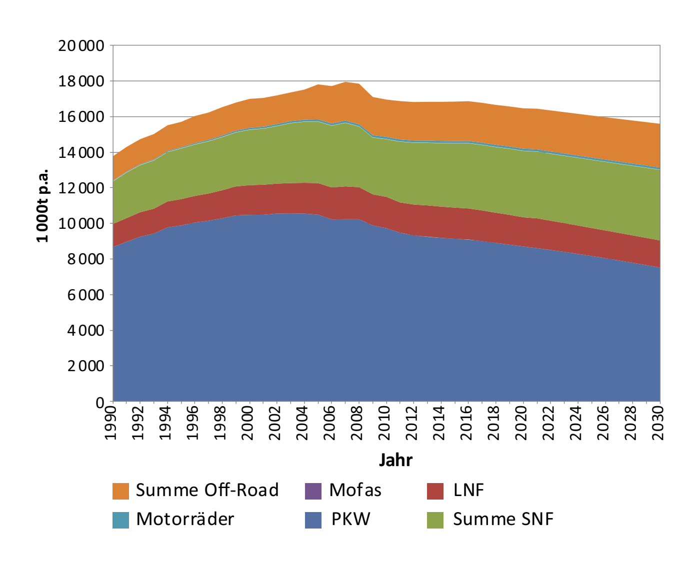


Abbildung 3.32 Entwicklung der CO_2-Emissionen des Verkehrs in Österreich von 1990 bis 2030 (WEM-Szenario), ohne Kraftstoffexport im Tank („Tanktourismus"). Quelle: Umweltbundesamt (2011b)

Figure 3.32 Development of CO_2-emissions in transport in Austria from 1990 to 2030 (WEM scenario), without export of fuel. Source: Umweltbundesamt (2011b)

additional measures" – WAM) im Rahmen der Klimastrategie und des „2020-Ziels" auf Europäischer Ebene, andererseits Prognosen bis 2050 mit dem Ziel der Überprüfung einer Energieautarkie in Österreich. In der Folge werden die Ergebnisse dieser Prognosen kurz dargelegt.

Grundlage für die CO_2-Emissionsszenarien in Österreich sind die Entwicklung des BIP, der Bevölkerung, der Kraftstoffpreise, der Inlandsnachfrage in Personen-km und in Tonnen-km sowie der Kraftstoffexport im Tank. Aufbauend auf den prognostizierten Verkehrsmengen und den Fahrleistungen nach Fahrzeugkategorie werden der Energieverbrauch und die Emissionen von CO_2, NO_x, NMHC und PM_{10} modelliert und dargestellt (Umweltbundesamt, 2011b).

Entsprechend der Zunahme der Verkehrs- und damit der Fahrleistung (Fzg-km) steigen der Energieverbrauch und die CO_2-Emissionen in den nächsten Jahren weiter an. Entsprechend der Prognosen stellt sich ein Rückgang der CO_2-Emissionen erst ab ca. 2015, weshalb das „20-20-2020-Ziel" nicht erreicht werden kann; die zu erwartenden Einsparungen gegenüber 2008 betragen ca. 4 %.

Bis 2030 ist unter Beibehaltung der geltenden Bestimmungen gegenüber 2010 mit einer Reduktion der CO_2-Emissionen von ca. 10 % auszugehen, gegenüber 1990 von einer Zunahme um ca. 12 %. Im Jahr 2030 werden ca. 45 % der CO_2-Emissionen des Verkehrs von PKWs und etwa 35 % im Straßengüterverkehr emittiert (vgl. Umweltbundesamt, 2011b; alle Werte ohne Berücksichtigung des Flugverkehrs).

Die CO_2-Emissionen des Verkehrs werden ebenfalls aufgrund des verstärkten Einsatzes von Kraftstoffen aus regenerativen Quellen („Biokraftstoffe") bis 2020 bzw. 2050 in der Summe nicht mehr im gleichen Ausmaß wie in der Vergangenheit ansteigen (EC, 2011e).[20] Die Szenarien basieren auf den implementierten Maßnahmen („WEM-Szenario") und beinhalten alle bereits beschlossenen Maßnahmen (Umweltbundesamt, 2011b, vgl. Abbildung 3.32):

- Biokraftstoffverordnung zur Umsetzung der Biokraftstoffrichtlinie (2003/30/EG)[21]
- Ökologisierung der Normverbrauchsabgabe (Nova)
- Mobilitätsmanagement – Beratungs- und Förderprogramme
- Spritsparinitiative
- Telematik – Erhöhung der Schifffahrtsleistung
- Reduktion der spezifischen CO_2-Emissionen von PKW bei Neuzulassung[22]

Im „WEM Szenario" wird angenommen, dass die Kraftstoffintensität der PKW ab 2015 in Folge der strikten CO_2-Zielwerte der EU abnimmt. Inwieweit diese Vorgaben unter realen Betriebsbedingungen in vollem Umfang eintreffen ist derzeit noch offen.

Die wesentlichen Erkenntnisse sind: Energieverbrauch und CO_2-Emissionen steigen leicht bzw. stagnieren bis 2030 während die Verkehrsleistung (tkm und pkm) kontinuierlich steigen. Der Anteil der „Biokraftstoffe" wird durch die Beimischungsverordnung erhöht. Der Stromverbrauch im Verkehr nimmt infolge angenommener steigender Flottenanteile von E- und Plug-In PKW bis 2030 ebenfalls zu (vgl. Abbildung 3.33).

Klimastrategie 2020

Die Ergebnisse der Szenarien für die Klimastrategie 2020 Österreichs im Rahmen der EU-Klimastrategie 20-20-20

[20] siehe Maßnahmen zum Einsatz von erneuerbaren Energiequellen zur Zielerreichung des „20-20 bis 2020-Ziels".

[21] Es sei darauf hingewiesen, dass eine Herabsetzung der Beimischungsziele von Kraftstoffen aus regenerativen Quellen („Biokraftstoffe") momentan (2013) auf europäischer Ebene in Diskussion ist. Eine Bewertung oder ein Ausblick der Entwicklung kann noch nicht durchgeführt werden.

[22] Die Vorgaben auf europäischer Ebene sehen vor, dass für Neuwagen 130 g CO_2/km als Grenzwert gilt. Die Einführung gilt ab 2012 (65 % der Neuwagenflotte muss diesen Grenzwert erreichen) bis 2015 (100 % der Neuwagenflotte muss diesen Grenzwert erreichen). In Diskussion ist ein strengerer Grenzwert von 95 g CO_2/km für 2020 (2013); die laufenden Diskussionen tendieren zu einer Verschiebung der Einführung.

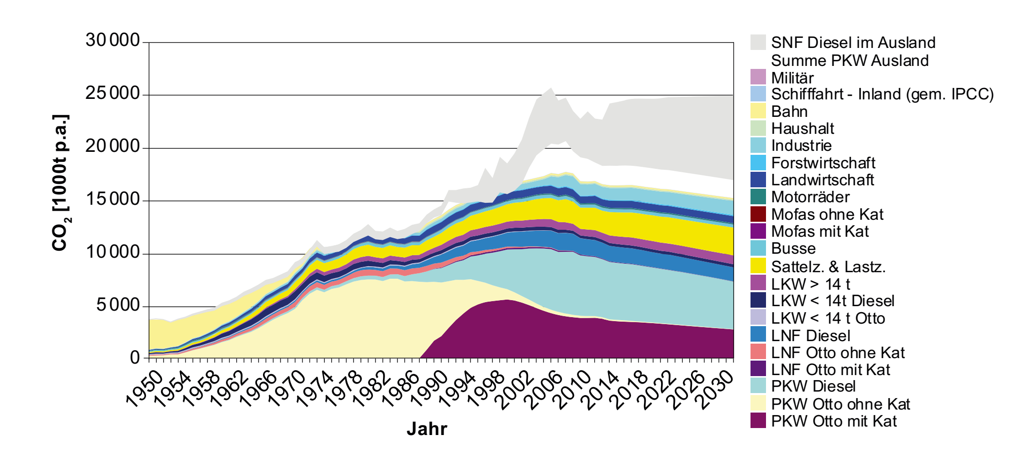


Abbildung 3.33 Entwicklung der CO_2-Emissionen gesamter Straßenverkehr (+öffentl. Verkehr) in Österreich 1950 bis 2030 im BAU-Szenario. Quelle: Hausberger und Schwingshackl (2011)

Figure 3.33 Development of CO_2 emissions in road traffic and public transport in Austria 1950 to 2030, BAU scenario. Source: Hausberger und Schwingshackl (2011)

(„WAM-Szenario"; bedeutet zusätzlich zu den im „WEM-Szenario" dargelegten bestehenden Maßnahmen) ergaben ein Reduktionspotenzial der CO_2-Emissionen des Verkehrs bis 2030 gegenüber 1990 um ca. 20 % reduziert werden (Umweltbundesamt, 2011b). Bis 2020 wird im Vergleich zu 2005 eine Einsparung von 16 % prognostiziert, womit das „20-20 bis 2020-Ziel" nicht erreicht wird. Um eine Reduktion der CO_2-Emissionen von 60 % bis 2050 erreichen zu können, werden zusätzliche Maßnahmen erforderlich sein (Umweltbundesamt, 2011b) (vgl. Abbildung 3.34).

Im Szenario WAM („With Additional Measures") werden die Effekte nicht beschlossener, aber mit hoher Wahrscheinlichkeit umsetzbarer zusätzlicher Maßnahmen abgeschätzt (Hausberger, Schwingshackl, 2011):

- Erhöhung der Mineralölsteuer (2,5 Cent / Liter).
- Verkehrsverlagerung im Personenverkehr: Die Maßnahmen umfassen den Ausbau und die Attraktivierung des öffentlichen Verkehrs und multimodaler Verkehrssysteme; Mobilitätsmanagement gemäß klima:aktiv Programm; Förderung des Radverkehrs; Raumplanung zur Optimierung der Erreichbarkeit von ÖV-Anschlüssen.
- Anschlussbahnförderung im Güterverkehr: Auf Basis des WEM-Szenarios wurde eine Verlagerung der Verkehrsleistung (Tonnenkilometer) von 2 % bis 2014 und 3,6 % bis 2030 von der Straße auf die Schiene angenommen.
- Effiziente Kfz-Nutzung: Die angenommenen Maßnahmen umfassen eine Geschwindigkeitsbeschränkung von 110 km / h auf Autobahnen (sofern keine niedrigere Geschwindigkeitsbeschränkung auf einzelnen Abschnitten bereits existiert) und ein höherer Anteil an alternativen Kraftstoffen und an Elektrofahrzeugen.

Zusätzlich wurde ein weiterführendes Szenario berechnet. Die wesentlichen Erkenntnisse sind, dass Energieverbrauch und CO_2-Emissionen bis 2030 deutlich sinken, während die Verkehrsleistung im Güterverkehr (tkm) stagniert und die Verkehrsleistung im Personenverkehr (pkm) leicht sinkt. Hier ist zu erkennen, dass die größten Preiseffekte im Kraftstoffexport im Tank auftreten. Dieser reagiert auf Änderungen von Preisdifferenzen zum Ausland und damit sensibler auf Inlands-Preisanstiege als die Inlandsnachfrage.

In Österreich wurde kürzlich eine Reihe von Studien erstellt, die sich mit dem Thema Energie / CO_2-Emissionen und Verkehr in langfristigen Perspektiven auseinander gesetzt haben.

Energieautarkie Österreich 2050

Die Frage, ob Österreich in Zukunft seine Energieversorgung weitgehend aus eigenen erneuerbaren Energiequellen bestreiten kann, wurde in vier Studien untersucht (Streicher et al.,

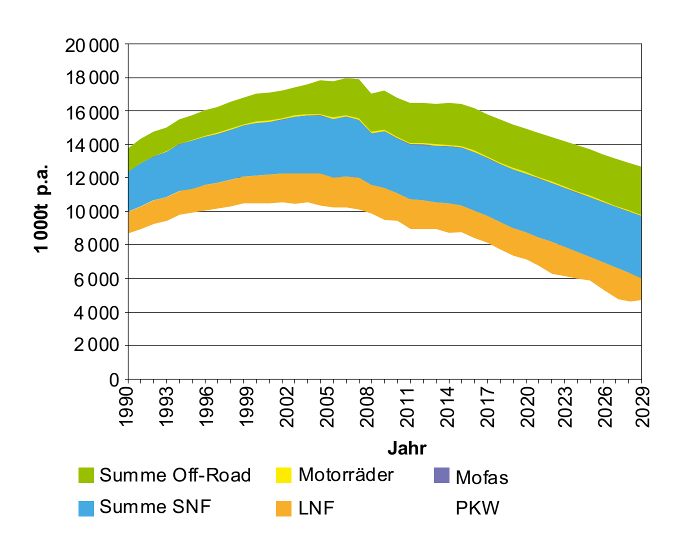


Abbildung 3.34 Entwicklung der CO_2-Emissionen des Verkehrs in Österreich von 1990 bis 2030 (WAM-Szenario), ohne Kraftstoffexport im Tank („Tanktourismus"). Quelle: Umweltbundesamt (2011b)

Figure 3.34 Development of CO_2-emissions in transport in Austria from 1990 to 2030 (WAM scenario), without export of fuel. Source: Umweltbundesamt (2011b)

Tabelle 3.3 Vergleichstabelle Studien zur Energieautarkie: Verkehrsleistung im Personenverkehr innerhalb von Österreich (nur Landverkehr) 2050. Quellen: Streicher et al. (2010); Umweltmanagement Austria (2011); Bliem et al. (2011)

Table 3.3 Comparative table studies „energy self-sufficient": transport performance in passenger transport in Austria (only land transport) 2050. Sources: Streicher et al. (2010);, Umweltmanagement Austria (2011); Bliem et al. (2011)

2050 [Mrd. pkm]	MIV	ÖV	NMV	∑	Index zum Basisjahr
Bliem et al., 2011	42,7	35,0	7,5	85,2	84
Streicher et al., 2010 Sz. Konstant (1)	57,5	48,5	6,8	112,8	110
Streicher et al., 2010 Sz. BAU opt. (3)	79,4	46,0	7,6	133,0	130
Umweltmanagement Austria (2011) Sz. Pragm.	54,9	32,7	6,1	93,7	101
Umweltmanagement Austria (2011) Sz. Forciert	12,4	28,6	5,2	46,2	50

2010; Umweltmanagement Austria, 2011; Bliem et al., 2011; Energieinstitut der Wirtschaft, 2012). Diese Vorgabe impliziert im Prinzip einen Ausstieg aus der Energieversorgung mit fossilen Energieträgern. Auf den Verkehrssektor bezogen ist dies nur unter der Prämisse einer fundamentalen Veränderung im Modal Split und bei den Antriebstechnologien bzw. bei der Energieart der Fahrzeuge möglich.

Allen drei erstgenannten Studien gemeinsam ist, dass der Energiebedarf Österreichs bis 2050 in etwa halbiert und der Energiebedarf des Sektors Mobilität um etwa zwei Drittel gesenkt werden muss. Innerhalb der Studien unterscheidet sich die Aufteilung auf die einzelnen Energiearten deutlich: In der Studie „Energie[R]evolution" wird schwerpunktmäßig auf Elektromobilität gesetzt, in den beiden anderen Studien wird vor allem auf Biomasse (einmal stärker in flüssiger Form, einmal stärker gasförmig) gesetzt. Allen gemein ist aber auch eine zum Teil signifikante Reduktion der Verkehrsleistung sowie eine deutliche Modal Split-Verschiebung zugunsten des Umweltverbundes. Die Bewertung der Umsetzbarkeit der Szenarien wurde nicht behandelt; Ziel dieser Studien war, prinzipiell zu überprüfen ob und wie Energieautarkie im Sektor Mobilität umsetzbar wäre.

Im Personenverkehr wird in der Studie „Energieautarkie Österreich 2050" (Streicher et al., 2010) das Ziel über eine Verlagerung vom Autoverkehr auf den Öffentlichen und nicht motorisierten Verkehr (50 % bzw. 60 % der Verkehrsleistung [Pkm] je nach Szenario) und für den verbleibenden Autoverkehr eine Verlagerung auf elektrisch angetriebene PKW (Hybrid- und E-Fahrzeuge) erreicht. Im Szenario „BAU optimiert" wird hingegen noch von einem (geringen) Wachstum der Verkehrsleistung bis 2050 ausgegangen (vgl. Tabelle 3.3).

In der Studie „Energie [R]evolution" wird ebenso von einer Reduktion der Verkehrsleistung und einer Verlagerung auf den ÖV und den NMV ausgegangen. Zum Erreichen der Zielsetzung wird der Fokus auf eine „Elektrifizierung" der Mobilität gelegt. Für den Flugverkehr wird angenommen, dass der Energiebedarf bis 2050 zur Gänze aus Biotreibstoffen abgedeckt wird (vgl. Tabelle 3.3), (Bliem et al., 2011)[23].

Der Energiebedarf im Sektor Mobilität kann somit um 70 % bezogen auf 2008 reduziert werden (Streicher et al., 2010). In der Studie „Energieautarkie für Österreich?" wird dies ebenfalls mit einer Verlagerung von rund 60 % der Verkehrsleistung auf den Öffentlichen Verkehr und den nicht motorisierten Verkehr erreicht; ebenso wird von einem deutlichen Rückgang der Verkehrsleistung ausgegangen. Je nach Szenario liegt dieser zwischen 12 % und 56 % für 2050 bezogen auf die Verkehrsleistung inkl. Flugverkehr von 2005 (Umweltmanagement Austria, 2011), (vgl. Tabelle 3.3).

Im Güterverkehr wird in der Studie „Energieautarkie Österreich 2050" (Streicher et al., 2010) von einer deutlichen Verlagerung des Straßengüterverkehrs auf die Eisenbahn und das Schiff bei gleichzeitig Wachstum von bis zu 60 % innerhalb von 45 Jahren ausgegangen. Das Ziel wird durch eine fast vollständige Verlagerung des Straßengüterfernverkehrs auf Schiene und Wasser und eine Reduktion des Flottenverbrauchs erreicht (Streicher et al., 2010; vgl. Tabelle 3.4).

Im Güterverkehr wird in der Studie „Energieautarkie für Österreich?" (Umweltmanagement Austria, 2011) ebenfalls auf eine deutliche Verlagerung des Güterverkehrs auf Schiene und Wasser ausgegangen, wobei die Verkehrsleistung insgesamt quasi konstant bleiben soll (vgl. Tabelle 3.4).

Nur in der Studie Energie [R]evolution wird von einem Rückgang der Verkehrsleistung im Güterverkehr ausgegangen; die Verlagerung auf die Schiene und das Wasser sind in einer vergleichbaren Größenordnung wie in den beiden anderen Studien (vgl. Tabelle 3.4).

[23] Eine Bewertung der Realisierbarkeit war nicht Gegenstand der zitierten Studie. Ob diese Annahmen bis 2050 realisierbar sind, kann demzufolge auch nicht angegeben werden.

Tabelle 3.4 Vergleichstabelle Studien zur Energieautarkie: Verkehrsleistung im Güterverkehr innerhalb von Österreich 2050. Quellen: Streicher et al. (2010); Umweltmanagement Austria (2011); Bliem et al. (2011)

Table 3.4 Comparative table studies „energy self-sufficient": transport performance in freight transport in Austria 2050. Sources: Streicher et al. (2010); Umweltmanagement Austria (2011); Bliem et al. (2011)

2050 [Mrd. tkm]	Straße	Schiene	Wasser	∑	Index zum Basisjahr
Bliem et al., 2011	16,5	27,0	2,5	46,0	84
Streicher et al., 2010 Sz. Konstant (1)	19,5	38,4	5,0	63,0	100
Streicher et al., 2010 Sz. BAU opt. (3)	36,1	44,9	7,0	88,0	160
Umweltmanagement Austria (2011) Sz. Pragm.	20,6	35,9	3,4	59,9	107
Umweltmanagement Austria (2011) Sz. Forciert	16,2	38,2	3,2	57,6	103

3.2.5 Adaptation und Mitigation: Lösungsansätze und politische Maßnahmen

Das Ziel, das derzeitige Verkehrssystem in ein nachhaltiges[24] überzuführen, ist ein äußerst ambitioniertes. Es impliziert nicht mehr und nicht weniger als einen nachhaltigen Systemwechsel (GEA, 2012).

Die Politik-Szenarien, die in Abschnitt 3.2.8 beschrieben werden, beschreiben alternative Pfade einer progressiven Transformation des österreichischen Verkehrssektors in Richtung Nachhaltigkeit. Es sei allerdings deutlich darauf hingewiesen, dass diese Transformation innerhalb der nächsten 50 bis 100 Jahre nur in einem globalen Kontext stattfinden können wird (vgl. GEA, 2012). Weiters ist in diesem Kontext hervorzuheben (vgl. ebenfalls GEA, 2012), dass diese globale Transition mit sozial ausgewogenen, ökologisch nachhaltigen und wirtschaftlich realisierbaren Entwicklungszielen gekoppelt sein muss.

Der erwähnte nachhaltige Systemwechsel impliziert grundsätzlich allerdings auch, dass die Verbrennung von fossiler Energie im Verkehr durch die Verschiebungen der zurückgelegten Wege zu nicht-motorisierten Verkehrsarten (weniger Fahrzeugkilometer) einerseits und einen möglichst effizienten Energieeinsatz im motorisierten Verkehr (weniger fossile Energie pro Fahrzeugkilometer) andererseits auch erreicht wird. Weiters muss eine integrierte Landnutzungs- und Verkehrsplanung vorgenommen werden, welche bei der Identifizierung geeigneter Politiken zur Realisierung der gewünschten Transition neben technologischen Entwicklungen einen Schwerpunkt darstellen (GEA, 2012).

[24] Wenngleich der zentrale Fokus auf den THG-Emissionen und den daraus erforderlichen Maßnahmen zu Adaption und Mitigation des Klimawandels liegt, ist doch das übergeordnete Ziel, das Verkehrssystem unter Berücksichtigung ökonomischer, sozialer und ökologischer Aspekte in ein nachhaltiges zu transformieren. Eine detailliertere Diskussion von Nachhaltigkeitskriterien an dieser Stelle würde allerdings den Rahmen dieser Arbeit sprengen.

In diesem Abschnitt beschreiben wir, welche Politiken und Maßnahmen prinzipiell existieren, um letztendlich – in geeigneten Portfolios implementiert – Übergänge zu nachhaltigen Verkehrssystemen zu ermöglichen.

Ein Überblick zu verkehrspolitischen Strategien

Die Realisierung eines nachhaltigen Verkehrssystems kann nur mit einem breiten Portfolio verschiedener Politiken, Maßnahmen und Aktionen umgesetzt werden. Diese Grundprinzipien sind in verschiedenen Arbeiten herausgefiltert (z. B. Ajanovic et al., 2011) – und können unter dem Überbegriff „Avoid, Shift, Improve" zusammengefasst werden. Darunter können dann die wichtigsten Kategorien politischer Instrumente – Planung & Regulierung, ökonomische Anreize, soft tools und technologische Verbesserungen – subsummiert werden.

Basierend auf diesen Überlegungen können die zu implementierende Politiken in die folgenden vier Kategorien eingeordnet werden (vgl. GEA, 2012):

- Regulierung und Verkehrsplanung (inkl. gesetzliche Maßnahmen: z. B. Rad- und Busspuren, emissionsfreie Zonen, Parkraumbewirtschaftung etc.
- Technische Maßnahmen: z. B. Hybrid-Busse, Autos mit Batterie oder Wasserstoffantrieb etc.
- „Soft measures": z. B. Information, Bildung / Erziehung, Eco-Drive Systeme für öff. Busse etc.
- Ökonomische Anreize und fiskalische Maßnahmen: z. B. Straßenbenützungsgebühren, Tarife des ÖV, Parkgebühren, green-city Steuern etc.

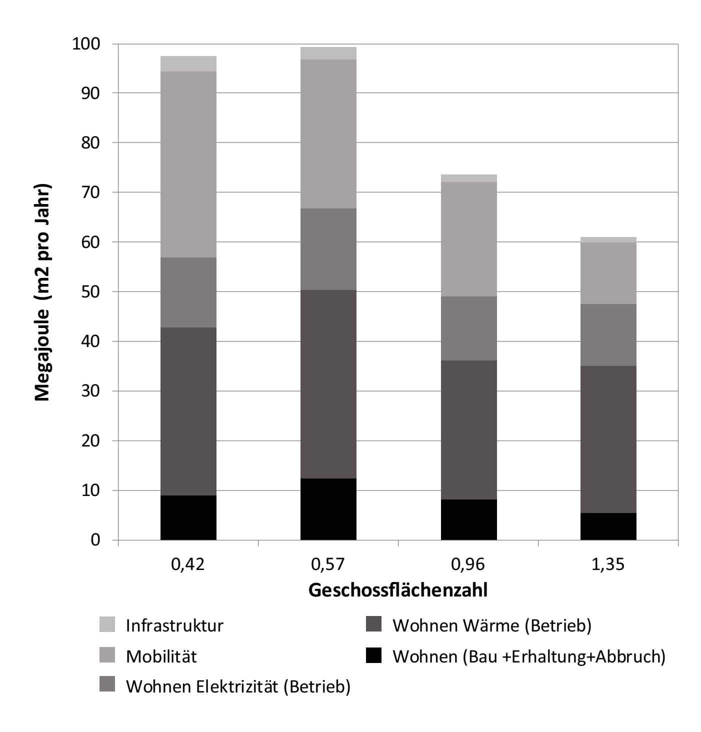


Abbildung 3.35 Primärenergieverbrauch verschiedener Siedlungstypen pro m² Bruttogeschossfläche (BGF) und Jahr. Quelle: Ott (2008)

Figure 3.35 Primary energy consumption of different types of settlements per m² gross floor area and year. Source: Ott (2008)

Maßnahmenblock A: Möglichkeiten im Bereich Stadt- und Raumplanung zur Reduktion der THG-Emissionen in Österreich

In diesem Kapitel werden die wichtigsten möglichen und bereits umgesetzten bzw. in Umsetzung befindlichen Maßnahmen im Bereich Stadt-/Raumplanung zur Reduktion der THG-Emissionen sowie zur Anpassung an den Klimawandel dokumentiert.

Die Forschung zu Raumordnungs- und Verkehrsaspekten ist in ihrer Analyse politischer Instrumente de facto zweigeteilt: einerseits werden Raumordnungsinstrumente auf ihre Wirkung auf Nutzungsveränderungen untersucht, andererseits verkehrspolitische Instrumente auf ihre Beeinflussung von verkehrlichen Strömen. In der realen Welt interagieren beide Bereiche und vor allem auch „Unvollkommenheiten“ in beiden Bereichen: zu billige Verkehrskosten (nicht internalisierte Umweltkosten des Straßenverkehrs) führen zu Zersiedelung, nicht verursachergerechte Aufschließungskosten (die Aufschließung peripherer Grundstücke wird durch jene zentraler subventioniert) führen zu Siedlungsstrukturen, die übermäßig viel Verkehrsbewegungen in Form von PKW-Verkehr verursachen.

Zusammenhang zwischen Primärenergieverbrauch und Siedlungsstruktur

Nachhaltige Raumordnung und -entwicklung stellt eine (langfristige) Schlüsselgröße zur Reduktion des Energieverbrauchs dar. Die Entwicklungen im Siedlungswesen haben einen maßgeblichen Einfluss auf den steigenden Energiebedarf. Die Siedlungsentwicklung in Österreich der letzten Jahrzehnte ist durch eine hohe Flächeninanspruchnahme, eine hohe Energieintensität, hohe Schadstoffemissionen und einen hohen Materialeinsatz gekennzeichnet. Die Wohnungsentwicklung hat sich weitgehend von der Bevölkerungsentwicklung abgekoppelt; d.h. die Zahl der Wohnungen wuchs in den letzten Jahren weitaus stärker an als die Bevölkerung. Die verstärkte Wohnraumschaffung – insbesondere im Stadtumland – führte ebenso wie die Ansiedlung von Betrieben, zu einer Ausweitung der Pendlerströme, die verkehrspolitische Implikationen sowie energie- und umweltrelevante Folgen mit sich bringen (Abbildung 3.35).

Sowohl in der „Klimastrategie – Anpassung 2007“ (BMLFUW, 2007) als auch in der „Energiestrategie Österreich“ (BMWFJ, 2010) werden bereits Maßnahmen zur Raumplanung angeführt. Aspekte wie Neuorientierung bei Verkehrs- und Raumplanung oder Erstellung eines Mobilitätskonzeptes des Bundes und der Länder wurden auch in der „Energiestrategie Österreich 2010“ übernommen. Am umfassendsten wurde das Thema im Österreichischen Raumentwicklungskonzept behandelt.

Österreichisches Raumentwicklungskonzept

Klimaschutz bzw. Klimawandelanpassung sind in den Raumordnungsgesetzen der österreichischen Bundesländer noch selten explizit erwähnt. Jedoch finden sich klimarelevante Raumordnungsziele wie die Sicherung und sorgsame Verwendung der natürlichen Lebensgrundlagen, sparsamer Flächenverbrauch und die Vermeidung der Zersiedelung der Landschaft in allen Raumordnungsgesetzen. In jüngeren Novellen wird zudem die Zielsetzungen einer energiesparenden Siedlungsentwicklung und die Verwendung von EET konkret angesprochen. Die Raumplanungsinstrumente (Flächenwidmungs- und Bebauungspläne, Regional- und Landesentwicklungspläne) haben diesen Zielen zu entsprechen, kurz gesagt: Ziele und Instrumente sind vorhanden, es fehlt an der konsequenten Anwendung. Allerdings zeigen aktuelle Landesentwicklungsprogramme bzw. auch Stadt- und Regionalentwicklungspläne sowie örtliche Entwicklungskonzepte meist eine Bewusstheit der raumplanerischen Mitverantwortung für

Klimaschutz und Klimawandelanpassung. Dementsprechend formulieren sie mittlerweile auch entsprechende Grundsätze und Maßnahmen. Unter dem Titel der Energieraumplanung steht Gemeinden und StandortentwicklerInnen zudem bereits eine Reihe von Planungstools zur Verfügung. Ein im Rahmen der ÖREK-Umsetzungspartnerschaft „Energieraumplanung" erstellter Bericht analysiert 20 von insgesamt 160 dieser Tools (Stöglehner, 2013). Auf gesamtösterreichischer Ebene definiert das 2011 von der Österreichischen Raumordnungskonferenz beschlossene und damit von Bund, Ländern sowie Gemeinden abgestimmte Grundsatzdokument „Klimawandel, Anpassung und Ressourceneffizienz" als eine der vier zentralen Säulen für eine wettbewerbsfähige, solidarische und nachhaltige Raumentwicklung (ÖROK, 2011).

Folgende allgemeinen Zielsetzungen sind dort festgehalten: „Um sowohl den Energiebedarf als auch die Klimaschutzpolitik nachhaltig zu gestalten, soll / sollen:

- […] eine nachhaltige Siedlungs- und Verkehrsentwicklung realisiert werden, um die weitere Flächenversiegelung zu limitieren und Ressourceneffizienz sicherzustellen;
- […] eine Reduktion der THG-Emissionen erfolgen, um dem Klimawandel ursächlich zu begegnen (Mitigation), sowie eine Verringerung des Energiebedarfs und eine Verlagerung von nicht erneuerbaren hin zu erneuerbaren Rohstoffen im räumlichen Verbund angestrebt werden;
- […] raumordnerische Maßnahmen eingesetzt werden, um bei der Bewältigung der Folgen des Klimawandels zu helfen (Adaption) und die Gefährdungen von Siedlungen und Gesellschaft zu begrenzen (Klimawandelanpassung; vgl. auch Policy Paper „Auf dem Weg zu einer nationalen Anpassungsstrategie", 2010);
- […] eine verstärkte Ressourceneffizienz mögliche negative Effekte einer Ressourcenverknappung;
- […] oder Verteuerung auf Wirtschaftswachstum und sozioökonomischen Wohlstand wieder ausgleichen
- […] entsprechende Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten umgesetzt werden." (ÖROK, 2011)

Als relevante Aufgabenbereiche und Handlungsmöglichkeiten sind u. a. konkretisiert (vgl. ÖROK, 2011:

- Raumordnung zur Verbesserung der Energieeffizienz einsetzen.
- Flächen für EET ausweisen.
- Integrierte Raum- und Energiekonzepte erstellen.
- Freihalten von Retentionsräumen („solidarische Retentionsräume") und Regelung von Nutzungsbeschränkungen.
- Verstärkte Kooperation und verbesserte Abstimmung zwischen den Oberlieger- und Unterlieger-Gemeinden.
- Berücksichtigung von Hochwasserrückhalte- und Hochwasserabflussflächen in der Flächenwidmung sowie der in den Waldentwicklungsplänen vorgesehenen schutzfunktionalen Waldarealen.
- Verstärkte Koppelung zwischen Flächenwidmung und Gefahrenzonenplanung.
- Nachhaltige Siedlungs- und Freiraumentwicklung.
- Flächensparen und Flächenmanagement: Verstärkte Koppelung von Flächenwidmung, Bebauungsplanung und aktiver Bodenpolitik.
- Festlegung von Energieeffizienzkriterien in der Flächenwidmung (Beispiel „Energieausweis für Siedlungen"), Erstellung integrierter Raum- und Energiekonzepte unter Berücksichtigung des Mobilitätsmanagements; kriteriengeleitete Ausweisung von Vorranggebieten für bestimmte Arten der Energieversorgung.
- Nachhaltige Mobilität.

Effizienzaspekte und Raumordnung

Fragen der Effizienz, wie Ressourcenverbrauch oder bebaute Fläche stehen in Verbindung mit der Raumplanung. Diese lassen sich anhand folgender Kategorien darstellen.

Ressourcenintensität: Etwa 70 % bis 80 % des Energie- und Materialeinsatzes werden durch die Bereiche Siedlungswesen und Verkehr – also durch räumliche Bedingungen – in Anspruch genommen. Potenziale zur Reduktion des Energiekonsums sind dementsprechend im Zusammenhang mit der Raumentwicklung zu analysieren.

Finanzmittelintensität: Die Bereitstellung von technischer und sozialer Infrastruktur in einer Region ist mit hohen Kosten verbunden. Durch eine effiziente Raumorganisation, welche der Zersiedelung entgegenwirkt, können erhebliche Einsparungen im Infrastrukturbereich erzielt werden.

Flächenintensität: Der Flächenverbrauch für Gebäude aller Art und Straßen nimmt kontinuierlich zu. Trotz eingeschränktem Dauersiedlungsraum auf Grund des hohen Gebirgs- und Waldanteils in Österreich, ist der Trend zur Zersiedelung sowie zu flächenintensiven Ein- und Zweifamilienhäusern ungebrochen. Die für Siedlungsraum verbrauchten Flächen stehen nicht für den Anbau von Energiepflanzen bzw. die Speicherung von CO_2 in Form von Biomasse zur Verfügung,

Verkehrsintensität: Durch Trends wie die wachsende Suburbanisierung, ein verändertes Freizeitverhalten und die Zu-

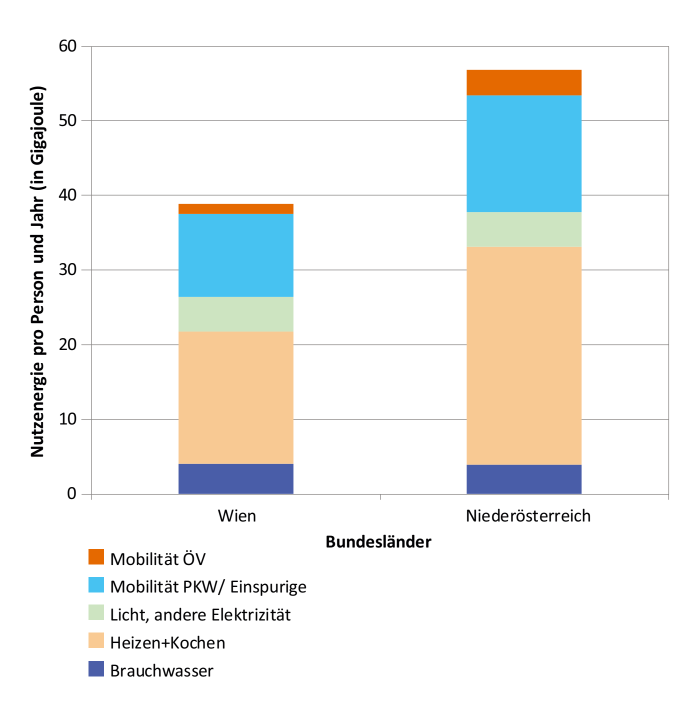


Abbildung 3.36 Deutliche Unterschiede bezüglich Energie-Aufwendungen in verschiedenen Siedlungsstrukturen. Quelle: VCÖ (2012)

Figure 3.36 Significant differences in energy consumption in different types of settlements. Source: VCÖ (2012)

nahme der interregionalen und internationalen Arbeitsteilung u. a.m. wird ein erhöhtes Verkehrsaufkommen bzw. ein wachsender Energieverbrauch mit den bekannten negativen Folgen für Mensch und Umwelt verursacht. Haushalte in Gebieten mit geringerer Siedlungsdichte verursachen vermehrt CO_2-Emissionen, weil diese durchschnittlich mit mehr PKWs ausgestattet sind und längere Wege (z. B. zum Arbeitsplatz oder zum Einkaufen) zurücklegen müssen. Innovative Gebäudekonzepte (z. B. Passivhäuser) ermöglichen am Einzelgebäude zwar einen niedrigeren Energieverbrauch, können jedoch nicht den steigenden Energieverbrauch des Verkehrs auf Grund zunehmender Zersiedelung verhindern. Daher werden langfristige und zukunftsorientierte Raumordnungsstrategien benötigt, deren primäres Ziel eine Verhinderung energieintensiver Raumstrukturen sein muss (vgl. Abbildung 3.36).

Raumplanung und Vermeidungsstrategien

Die Leitbilder, Instrumente und Methoden der Raumplanung umfassen wesentliche Ansatzpunkte von Vermeidungsstrategien wie ressourcenschonende Siedlungsstrukturen und die Flächenvorsorge für erneuerbare Energien:

Stadt / Region der kurzen Wege durch eine verkehrssparende Organisation der Funktionen (Wohnen, Arbeiten, Versorgen, Erholen) im Raum sicherstellen. Dies erfordert Kooperation auf verschiedenen Ebenen (lokal, regional, überregional) und eine abgestimmte, Gemeindegrenzen überschreitende Entwicklungsstrategie. Durch eine „dezentrale Konzentration" (kompakte und durchmischte Siedlungsentwicklung, Stärkung von Ortskernen) können KFZ-Verkehr vermieden und klimawirksame Emissionen reduziert werden. Insbesondere in den Agglomerationsräumen besteht hohes Verdichtungspotential (hoher Einfamilienhausanteil in den Speckgürteln).

Eine Stadt / Region der kurzen Wege „entspricht dem Leitbild der sanften Mobilität und somit der nachhaltigen Stadtentwicklung und bedeutet im engeren Sinn die Schaffung kompakter, ressourceneffizienter Siedlungsstrukturen, eine strukturell ausgewogene Durchmischung miteinander verträglicher Nutzungen und die gute Erreichbarkeit von Einrichtungen der Nahversorgung und Orten der Naherholung in fußläufiger Entfernung bzw. ergänzend mit öffentlichen Verkehrsmitteln." (Voigt et al., 2008).

Eine Siedlungsstruktur der kurzen Wege gemeinsam mit einer entsprechenden Funktionsmischung ermöglicht den VerkehrsteilnehmerInnen mehr Wege mit dem ÖV, dem Rad oder zu Fuß zurückzulegen weil deren – durch Körperenergieaufwand gegebenen – Einsatzgrenzen nicht überschritten werden.

Es ergeben sich erhebliche empirische Unterschiede auf Basis der KONTIV-Erhebungen (= theoretische Potentiale) zwischen Ballungsräumen und ländlichen Siedlungsgebieten insbesondere in Bezug auf Motorisierungsgrade (–20 % in städtischen Bereichen), Wegeweiten (–40 %), oder Verkehrsleistungen (–55 %) (Ott, 2008, Hesse und Trostorff, 2000). Wie Haushaltsbefragungen zu den diversen Verkehrskonzepten zeigen, machen insbesondere in Gemeinden mit weniger als 20 000 EinwohnerInnen externe Wege den größten Anteil an den zurückgelegten Distanzen aus. Die genannten Potentiale sind daher in hohem Ausmaß auf externe (außerhalb der Heimatgemeinde) zurückgelegte Wege zurückzuführen. Die Berücksichtigung der externen Wege und damit der Lage im Raum (in Bezug zu den nächstgrößeren Zentren – Zentrale Orte Prinzip) ist daher wesentlich (vgl. Hesse and Trostorff, 2000)

Zahlreiche Projekte zum Zusammenhang von Energie und Siedlungsentwicklung wurden in den letzten Jahren durchgeführt und es stehen mittlerweile Energierechner für Siedlungsstrukturen zur Verfügung. Das aus dem Klima- und Energiefonds geförderte Projekt EFES (Energieeffiziente Siedlungen) kommt im Endbericht zu folgendem Schluss: „Generell kann aus dem Energy Rating das Missverhältnis zwischen den Fortschritten im Gebäudebereich und den bisher geringen Anstrengungen im Mobilitätsbereich und im Bereich des Nutzerverhaltens sehr gut abgelesen werden. Im Bereich der Mobilität

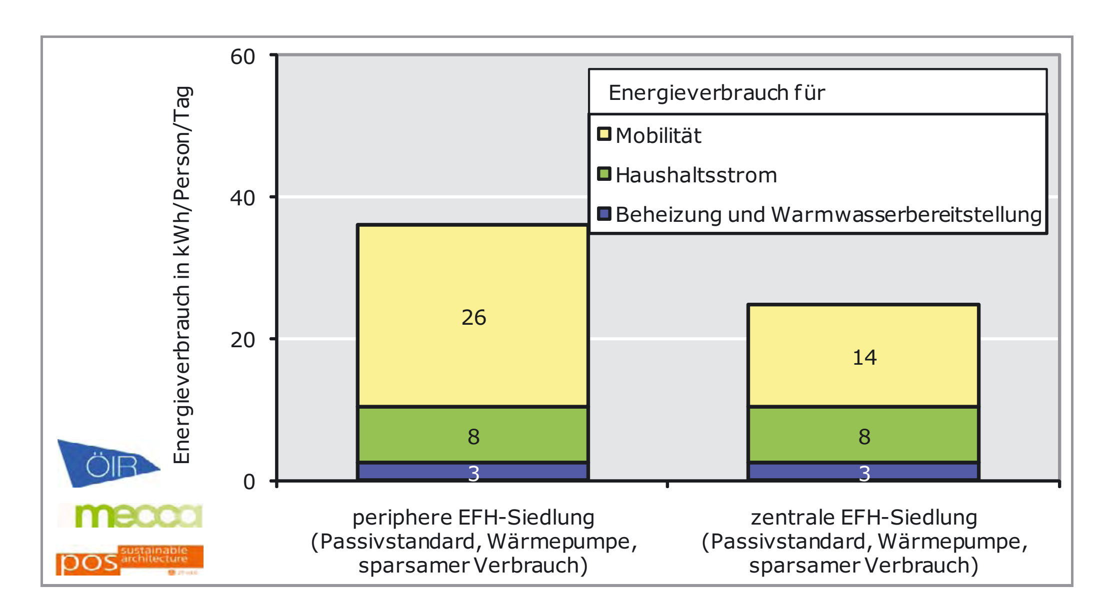


Abbildung 3.37 Vergleich des Energieverbrauches einer zentrale gelegenen mit einer peripheren Passivhaussiedlung. Quelle: Dallhammer et al. (2010)

Figure 3.37 Comparation in energy consumption between a central and peripherical located passive house settlements. Source: Dallhammer et al. (2010)

kann bemerkt werden, dass ein Wohngebiet mit sehr schlechter ÖV-Erschließung um 80 % mehr Primärenergie verbraucht als ein Wohngebiet in sehr gut erschlossener Lage. Außerdem lassen die unterschiedlichen Szenarien erkennen, dass die Variation der Anzahl der Stellplätze einen erheblich stärkeren Effekt auf den Primärenergiebedarf für Mobilität hat, als die Variation bei der ÖV-Versorgung. Im folgenden Beispiel kann dieser Unterschied der Versorgungslage noch etwas deutlicher dargestellt werden: Die beiden verglichenen Siedlungen sind beide im Passivhausstandard erbaut, werden mit Wärmepumpe beheizt und ihre BewohnerInnen kennzeichnen sich durch sparsames Verbrauchsverhalten aus. Allerdings liegt Siedlung 1 in peripherer Lage, ist somit sehr schlecht versorgt, die zweite Siedlung ist zentral gelegen und umgeben von zahlreichen Versorgungseinrichtungen und mit öffentlichem Verkehr sehr gut erschlossen. Hierbei ist erkennbar, dass Siedlung 1 im Mobilitätsbereich um 80 % mehr Primärenergie benötigt als die vergleichbare, im Zentrum gelegene Siedlung.“ (Dallhammer et al., 2010, vgl. Abbildung 3.37)

Es existiert eine Mindestgröße und -dichte von Siedlungen um eine effiziente Erschließung mit öffentlichem Verkehr gewährleisten zu können. Erschließungskosten, Flächenverbrauch und Emissionen steigen mit abnehmender Bebauungsdichte und zunehmender Zersiedlung stark an. Die räumliche Verteilung der Aktivitäten soll eine gute Erreichbarkeit mit einem kostenmäßig vertretbaren Aufwand mit öffentlichen Verkehrsmitteln ermöglichen.

Mit der zunehmenden Individualisierung der Gesellschaft, der arbeitsteiligen Organisation, der steigenden Ansprüche und Bedürfnisse, ist das Ziel einer verkehrssparsamen Siedlungsstruktur nur mit einem Mindestmaß an Größe und Dichte der Siedlungen zu erreichen. Dies erfordert allerdings eine Entwicklungspolitik die Klein- und Mittelstädte fördert und nicht weiter auf die Erhaltung von dezentralen dörflichen Strukturen mit schlechter Versorgung mit öffentlichem Verkehr und langen Wegen zu den Arbeitsplatzzentren setzt. Folgende Maßnahmen könnten zur dezentralen Konzentration beitragen (sie betreffen allerding nicht nur die Raumplanung, sondern auch die relevanten sektoralen Politiken): Finanzausgleich, Wohnbauförderung bzw. Eigenheimzulage, Steuerung des Zweitwohnungsbaus oder auch die Erhöhung der Kostenwahrheit und Umsetzung des Verursacherprinzips bei der Versorgung mit verkehrlicher und technischer Infrastruktur. „Hier eröffnet sich ein zentraler raumpolitischer Zielkonflikt: die Aufrechterhaltung der ländlichen dörflichen Strukturen, die Vermeidung von Abwanderung, Entsiedelung und Entleerung steht im Widerspruch zu klimapolitischen Zielen, solange der Kfz-Verkehr einer der Hauptverursacher des Klimawandels ist und eine ausreichende flächendeckende Erschließung mit öffentlichem Verkehr fehlt.“ (CIPRA, 2010)

Innenentwicklung statt Zersiedlung kann durch die Förderung verdichteter Bauformen und Mischnutzung forciert werden. Bauland darf nur noch dort gewidmet werden, wo eine adäquate Erreichbarkeit mi öffentlichen Verkehrsmitteln

gegeben ist. Dies erfordert eine Kopplung der Wohnbauförderung an raumplanerische Kriterien und Instrumente. Die Wohnbauförderung wird im Allgemeinen undifferenziert, d. h. unabhängig von raumplanerischen Kriterien (Lage, Erreichbarkeit, Umfeld) gewährt, was den Prozess der Zersiedelung verstärkt und für die räumliche Entwicklung sowie den Klimaschutz als kontraproduktiv bezeichnet werden muss. Das Niedrigstenergiehaus draußen auf der grünen Wiese, von dem man – zwangsmobil – mit dem Auto in die Stadt fährt, verbraucht deutlich mehr Energie als eingespart wurde. Die Novellen der Wohnbauförderungsrichtlinien der Länder haben in den letzten Jahren durchwegs wichtige Schritte in Richtung Ökologisierung und Klimaschutz gesetzt, indem unterschiedliche Förderungssätze nach dem Grad der Energieeinsparung eingeführt wurden. Auch wenn in Fragen der Bauausführung (Isolierung, Heizungssystem) bereits beachtliche Erfolge erzielt werden konnten, finden sich in der Wohnbauförderung noch kaum Ansätze für eine raum- und verkehrsparende Steuerung der Siedlungsentwicklung. Ein weiteres Ungleichgewicht zwischen den Verkehrsträgern zu Ungunsten des Umweltverbundes verursacht zudem die Förderung von Garagen bzw. Garagenabstellplätzen.

Die Innenentwicklung von Städten und Siedlungen stellt an die kommunalen Verwaltungen komplexe Herausforderungen (Baulandmobilisierung, Flächensicherung, Flächenrecycling, Kooperation auf verschiedenen Ebenen). Die Städte und Gemeinden müssen einerseits bestmögliche Rahmenbedingungen für private InvestorInnen schaffen, andererseits aber dabei auch die öffentlichen Interessen der Allgemeinheit vertreten. Das Kräftespiel zwischen öffentlichen und privaten Interessen benötigt auf beiden Seiten bewegliche Verhandlungsformen und die angepasste Planungsprozesse sowie -instrumente.

Integrative Standortpolitik fördern, um die Erreichbarkeit für KundInnen und MitarbeiterInnen mit öffentlichen Verkehrsmitteln zu gewährleisten sowie Standorte mit Schienenanschluss zu begünstigen. Regionale Wirtschaftskreisläufe fördern um lange Transportwege zu vermeiden.

Die Intensität des Standortwettbewerbs hat sich angesichts veränderter Rahmenbedingungen in den letzten Jahren deutlich verschärft (vgl. CIPRA, 2010). Die traditionellen Instrumente der Wirtschaftsförderung und Standortpolitik scheinen nur noch bedingt in der Lage zu sein, den gestiegenen Herausforderungen gerecht zu werden. Einerseits konkurrieren die Gemeinden um Betriebe, was zu Betriebsstandorten führt, die nur mit dem PKW erreichbar sind oder abseits eines Bahnanschlusses liegen. Andererseits gibt es aber auch Instrumente der interkommunalen Zusammenarbeit in Gemeindeverbänden und Formen eines horizontalen Finanzausgleichs, z. B. Entschädigung von Gemeinden für die Erhaltung von Erholungsflächen. Im Fall von öffentlichen Infrastrukturinvestitionen oder Förderungen kann die Standortentwicklung an eine nachhaltige Mobilitätsorganisation gekoppelt werden.

Besonders klimarelevant ist die Integration in das Siedlungsgebiet und die Erschließungsmöglichkeit im Umweltverbund bei Handelsstandorten sowie publikumsintensiven Versorgungs- und Freizeiteinrichtungen. Aufgrund von Novellierungen der Raumordnungsgesetze können in den meisten Bundesländern Handelseinrichtungen ohne Größenbeschränkung nur mehr in „Zentrumszonen", also integriert in die Siedlungsstruktur genehmigt werden. Die Vermeidung von Agglomeration kleinerer Handelseinrichtungen an den Betriebsgebieten der Ortsrändern (z. B. Diskonter am Kreisverkehr) lässt sich jedoch noch nicht befriedigend steuern. Umgekehrt finden wir mittlerweile aber in zahlreichen Marktgemeinden und Kleinstädten wieder lebendige Ortskerne vor wie z. B. in Ottensheim, Lauterach oder Waidhofen / Ybbs, die über eine aktive Raumplanung verfügen und in denen Maßnahmen der Stadt- / Dorferneuerung umgesetzt wurden (vgl. LandLuft, 2012).

Konsequent ressourcensparendes Bauen fördern und Abstimmung der Siedlungsstrukturentwicklung mit bestehenden Infrastrukturnetzen (z. B. Fernwärme- und Fernkältenetzen, öffentlicher Verkehr).

Dazu ist es erforderlich, für Siedlungsgebiete und Bauvorhaben auch Anschlusspflichten bzw. Anreize z. B. zum Anschluss an das Fernwärmenetz zu definieren, wofür erst in einigen Bundesländern die gesetzlichen Voraussetzungen gegeben sind und generell wenig Praxiserfahrung vorliegt. Wesentliche Aufgaben wie in räumlichen Sachprogrammen Energie zusammengeführt werden sollte sind vor allem (vgl. Stadtland, 2010):

- Darstellung der (vorhandenen) Energieversorgung (Kraftwerke, KWK-Anlagen, Heizwerke, Müllverbrennungsanlagen etc.).
- Festlegung der Prioritäten der verschiedenen Energieträger sowie Darstellung des räumlichen Bezugs.
- Darstellung von nutz. B.aren Energieversorgungs- und Abwärmepotenzialen (Industrie, Abwasser, Oberflächengewässer, Geothermie, Biomasse, Müllverbrennungsanlagen, Umgebungswärme).
- Darstellung von (vorhandenen) Großabnehmern (Industrie, Gewerbe, ev. dichte Siedlungsgebiete) für Strom, Wärme und Kälte.

- Ausweisung von Eignungszonen sowie Ausschließungsgebiete für Windenergieerzeugungsanlagen, Photovoltaik / Solarthermie, Geothermie / Erdwärmesonden.
- Umgang mit bestehenden konventionellen Anlagen sowie mit Wasserkraft.
- Ausweisung von Eignungsgebieten (Vorranggebiete) für leitungsgebundene Energieträger (Fernwärme, Erdgas, Fernkälte).
- Festlegungen zur Energieeffizienz von Siedlungskörpern und des Verkehrssystems.

Flächenvorsorge für EET (Windräder, Photovoltaik, Wasserkraft, Biomasseproduktion) ist aktiv zu betreiben und mögliche Konflikte zwischen der Nutzung erneuerbarer Energien (Wasser, Wind, Biomasse), dem Naturschutz und anderen Nutzungen (Forst, Tourismus, Jagd, Energiewirtschaft, etc.) zu vermeiden.

Unterschiedliche Maßnahmen im Bereich der Raumplanung können aktiv zur einer regionalisierten Energieversorgung mit erneuerbaren Energien beitragen: Verankerung von Klimaschutz und Energiesicherheit in den Raumordnungszielen, Neugestaltung der Bauordnungen zur optimalen Nutzung von Solarenergie im Neubau und bei der Bestandssanierung oder auch die räumliche Festlegung von Standorten für Energieproduktionsanlagen. Insbesondere durch die Mitwirkung / Koordination bei der Erstellung von regionalen / lokalen Energiekonzepten und Energieleitbildern kann die ressourcenschonende Raumentwicklung forciert und auf eventuelle Nutzungskonflikte vorausschauend reagiert werden. (vgl. CIPRA, 2010).

In mehreren Bundesländern sind Zonen bzw. Kriterien für die Nutzung EET definiert, insbesonders Windkraftanlagen. Ein international beachtetes best-practice-Beispiel ist das Regionale Rahmenkonzept für Windkraftanlagen im Nordburgenland (Stanzer, 2010).

Erklärungsansatz zu den Wirkungsmechanismen der Interaktion von Raumordnung und Verkehr

In einer Kopplung eines Wohnortwahlmodells mit einem Verkehrsmodell (Verkehrsprognose Österreich 2025+) untersuchen Kulmer et al. (2012) für eine österreichische Region (Landeshauptstadt und Umfeld) erstmals auch die wechselseitige Wirkung der Instrumente (zur Methode: Bednar-Friedl et al., 2011). Für ökonomische verkehrliche Instrumente (gezeigt am Beispiel der Erhöhung der variablen PKW-Kosten pro Kilometer, wie einer Erhöhung der Mineralölsteuer oder PKW-Road Pricing) stellt sich heraus, dass diese nur bei einer Höhe, wie sie politisch nicht akkordierbar wäre, merkbar zu einer veränderten Siedlungsstruktur führen würde (d. h. die Zersiedlung einbremsen würde). Im Kern sind die Unterschiede in den Grundstückspreisen zwischen Stadt und Umland so groß, dass sie alle verkehrlichen Kostenüberlegungen der Haushalte dominieren. Die Zersiedlung kann somit durch Erhöhung der Verkehrskosten nicht realistisch unterbunden werden.

Umgekehrt hingegen wirken raumplanerische Instrumente zwar primär auf die Siedlungsstruktur, diese aber merkbar auf die sich durch diese Siedlungsstruktur einstellenden Verkehrsströme (sowohl in Umfang wie auch in Modal Split). Dies zeigt unter Verwendung des aktuellsten österreichischen Verkehrsprognoseinstruments (Verkehrsprognose 2025+), dass der Ansatz der Raumplanung und seiner Instrumente auch quantitativ die Verringerung des PKW-Verkehrs durch kürzere Wege und Verlagerung auf andere Verkehrsmittel effektiv vorantreiben könnte. Sehr eindeutig wird in dieser Arbeit auch gezeigt, dass die Raumplanung eine notwendige, aber nicht hinreichende Voraussetzung für eine effektive Verlagerung ist: die simultane Förderung des Öffentlichen Verkehrs (Taktverdichtung, Qualitätssteigerung) kann die Verlagerungswirkung wesentlich erhöhen.

Diese Schlussfolgerung wird auch durch Steininger (2008) unterstützt, einer Untersuchung der quantitativen verkehrlichen Auswirkungen einer haushälterischen Standortentwicklung für den Zentralraum Salzburg. Für den Zeithorizont 2025 zeigt diese Studie, dass der Anstieg der THG-Emissionen aus dem Verkehr von 13,5 % im Trendszenario auf 3 % eingebremst werden kann, wenn das Sachprogramm einer haushälterischen Standortentwicklung in diesem Zentralraum umgesetzt wird.

Raumplanung und Anpassungsstrategien

Elemente und Instrumente raumplanerische Anpassungsstrategien an den Klimawandel österreichweit (Österreichisches Raumentwicklungskonzept) bzw. auf Ebene der Länder, Regionen und Gemeinden wurden bereits zu Beginn dieses Kapitels angesprochen. Auf transnationaler Ebene liegt für den Alpenraum die „Transnational Strategy for Climate Proof Spatial Planning“ (Stadtland, 2011) vor. Der Alpenraum ist hinsichtlich des Klimawandels besonders gefährdet (hohe vulnerability, geringe Resilienz). Die Anpassungsstrategie soll EntscheidungsträgerInnen und Verantwortlichen der Raumplanung und anderer raumrelevanter Fachplanungen als Orientierungs- und Entscheidungshilfe zur Entwicklung geeigneter Anpassungsstrategien und -maßnahmen an den Klimawandel dienen. In sektorübergreifenden Aktionsfeldern wurden jene Maßnahmen und Handlungsoptionen gebündelt, die aus

Sicht der Raumplanung die größten Anpassungserfolge für den Alpenraum erwarten lassen.

Generelle Handlungsfelder:

- Weiterentwicklung der Planungsinstrumente
- Ländergrenzen und Sektoren übergreifende Zusammenarbeit
- Wissensbasis und Wissenstransfer
- Bewusstseinsbildung
- Awareness-raising
- Spezifische Handlungsfelder
- Resiliente Siedlungs- und Infrastruktur
- Schutz vor Naturgefahren
- Integriertes Wasser- und Ressourcnmanagement
- Landschaftsentwicklung und Freiraumsicherung
- Neuorientierung im Tourismus

Als Schwerpunktaufgaben in der Raumplanungspraxis sind folgende Aspekte zu nennen:

Der Umgang mit neuen und / oder verschärften klimabezogenen Naturgefahren erfordert die Veränderung der Gefahrenzonenplänen / Gefahrenkarte. Deshalb sind Maßnahmen wie die Rückwidmung von Bauland in neuen Gefährdungszonen, die Flächensicherung für zusätzliche Schutzmaßnahmen (Ausweitung von Wasserrückhalteflächen, Hochwasserdämme, Lawinenschutz- und Wildbachverbauungen) oder die Präzisierung von Regelungen in Bebauungsplänen zur Gefahrenabwehr (z. B. Dachneigung, Dachlast, Verbotszonen für Gefahrenstofflagerung und Nutzung in Keller- und Erdgeschossen) notwendig.

Vorbeugende Schutzmaßnahmen (z. B. Retentionsflächen zur Wasserrückhaltung) müssen in Gebieten bzw. Gemeinden vorgenommen werden, die von diesen Maßnahmen nicht profitieren, sondern Nachteile haben (Nutzungseinschränkungen, Kosten). Es braucht also regionale, gemeindeübergreifende Konzepte, die einen Ausgleich zwischen Kosten und Nutzen erfordern. Dafür liegen noch keine verallgemeinerbaren Modelle vor, doch zeigen unzählige good-practice Beispiele den Nutzen sowie Lösungsansätze auf.

Horizontale und vertikale Kooperation auf allen Ebenen (Bund. Land und Gemeinden) zur integrierten Siedlungsentwicklung und im Bereich Katastrophenvorsorge und -schutz. Koordination verschiedener Förderungen und Politiken (z. B. Verkehrs-, Finanz-, Wirtschafts-, Wohnungspolitik) auf allen Ebenen.

Zur Vermeidung von Wärmeinseln in dicht bebauten Kernstädten trägt der Schutz und Ausweitung innerstädtischer (z. B. Dach- und Hofbegrünung, Bepflanzung von Fassaden und Straßenräumen) Grün- und Freiflächen bei. Zur Sicherung von Frischluftschneisen und grünen Kühlräumen im Rahmen der Regional-, Stadt- und Gemeindeplanung gibt es noch wenig Praxiserfahrung.

Umgang mit Unsicherheit: Generell lassen die Klimamodelle derzeit noch keine regionalen und kleinräumigen Aussagen über die Wirkungen des Klimawandels zu, was die Argumentationskraft und die rechtlich stichhaltige Restriktion im Rahmen der Regionalplanung sowie Flächenwidmungs- und Bebauungsplanung erschwert.

Maßnahmenblock B: Technische Lösungsansätze alternativer Antriebstechnologien, alternativer Energieträger und Effizienzsteigerungen konventioneller „Fahrzeuge"

In diesem Kapitel wird der derzeitigen Stand und die Zukunftsperspektivem für Technologien und alternative Energieträger im Verkehrsbereich bis 2050 dokumentiert.

Mögliche technische Lösungsansätze beziehen sich auf die folgenden zentralen Schwerpunkte:

- Verbesserung der derzeit genutzten Technologien, was vor allem im Bereich des motorisierten Individualverkehrs von vorrangiger Bedeutung ist.
- Forcierung neuer emissionsarmer Antriebskonzepte: Hier stehen vor allem Fahrzeuge mit Elektroantrieben und Brennstoffzellen im Mittelpunkt.
- Nutzung alternativer Energieträger: Biofuels, Wasserstoff, CNG, Biomethan etc.

Um diese Probleme zu lösen, sind die Steigerung der Effizienz der Fahrzeuge und die Reduktion der Effizienz ausgedrückt in g CO_2 / km wichtige Strategien in Europa, den USA, Japan und anderen Ländern (vgl. EC, 2010; JAMA, 2008). Z. B. hat die EC im Jahr 2007 als Ziel festgelegt für 2012 eine Reduktion von ca. 25 % der Werte von 2006 anzustreben, ein Wert von 120 g CO_2 / km bis 2012. Wie allerdings Abbildung 3.38 zeigt war schon 2010 absehbar, dass dieses Ziel nicht erreicht werden würde. Ein Grund dafür waren die weiter steigenden Leistungen der Fahrzeuge und darüber hinaus die Fahrleistungen.

Verbesserungspotenziale bei derzeit genutzten Technologien:

Zunächst analysieren wir Möglichkeiten, die Effizienz der derzeit genutzten Antriebstechnologien zu verbessern. In Benzinfahrzeugen gehen mehr als 60 % der Kraftstoffenergie im

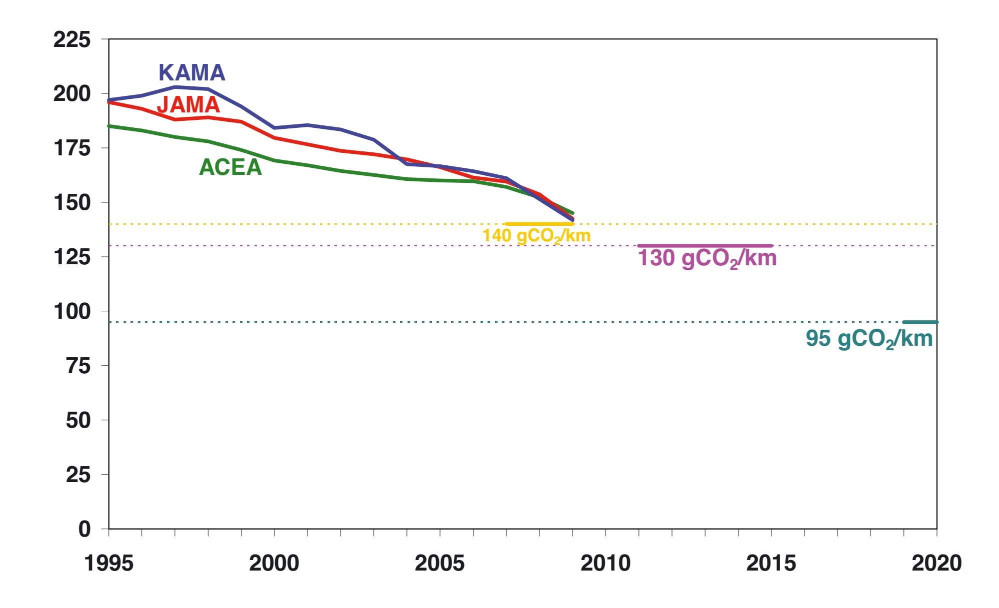


Abbildung 3.38 CO_2-Emissionen von neu zugelassenen PKWs unterschieden nach Automobilherstellerverbänden aus Europa (ACEA), Japan (JAMA) und Korea (KAMA), adaptiert nach den Veränderungen in den Testzyklen. Quelle: EC (2010)

Figure 3.38 CO_2-emissions from new passenger cars by the European (ACEA), Japanese (JAMA) and Korean (KAMA) car manufacturer associations (adjusted for changes in test cycle procedure). Source: EC (2010)

Verbrennungsmotor verloren. Dieselfahrzeuge sind hier um ca. 15–25 % effizienter.

Obwohl der Verbrennungsmotor eine ausgereifte Technologie darstellt, gibt es noch eine Vielzahl an Verbesserungspotenzialen (siehe z. B. Toro et al., 2010). Tabelle 3.5 gibt einen Überblick zu möglichen Maßnahmen, die Effizienz von Fahrzeugen durch Verbesserung der Motor- und Übertragungstechnologien zu steigern.

Tabelle 3.6 fasst Projektionen von Effizienzsteigerungen an Fahrzeugen im Vergleich zu einem Benzinfahrzeug (in %) für verschiedene Antriebssysteme aus verschiedenen Studien zusammen. Wie diese Tabelle zeigt, kann bei Benzin- und Dieselfahrzeugen bis 2050 eine kontinuierliche Verbesserung realisiert werden, und insgesamt mit verbesserten Technologien fast 50 % Effizienzsteigerung erreicht werden. Aber auch bei den elektrischen Antrieben und der Brennstoffzelle sind weitere Effizienzsteigerungen zu erwarten (vgl. Tabelle 3.6).

Vergleichende ökonomische und ökologische Bewertung

Wie bereits gezeigt, haben die analysierten Technologien bereits heute eine deutlich höhere Effizienz und geringere CO_2-Emissionen als konventionelle Fahrzeuge. Das grundsätzliche

Tabelle 3.5 Mögliche Maßnahmen, die Effizienz von Fahrzeugen durch Verbesserung der Motor- und Übertragungstechnologien zu steigern. Quelle: Kobayashi et al. (2009)

Table 3.5 Potential measures to enhance the efficiency of engine and transmission technologies. Source: Kobayashi et al. (2009)

	2010	2020	2030–2035	2050
Gasoline (G)	6–15	29	37–53	28–45
Diesel (D)	15–29	48	46–60	32–47
Hybrid-G	17–57	57	64–69	40–52
Hybrid-D	36–59	63	72	40–55
Fuel cell	53–58	71–74	63	
Fuel cell-hybrid	52–73	76–78		
Electric vehicle	82	80		

Tabelle 3.6 Projektionen von Effizienzsteigerungen an Fahrzeugen im Vergleich zu einem Benzinfahrzeug (in %). Quelle: Kobayashi et al. (2009)

Table 3.6 Forecast in increasing the efficiency of vehicles compared to a gasoline vehicle (in%). Source: Kobayashi et al. (2009)

	2010	2020	2030–2035	2050
Gasoline (G)	6–15	29	37–53	28–45
Diesel (D)	15–29	48	46–60	32–47
Hybrid-G	17–57	57	64–69	40–52
Hybrid-D	36–59	63	72	40–55
Fuel cell	53–58	71–74	63	
Fuel cell-hybrid	52–73	76–78		
Electric vehicle	82	80		

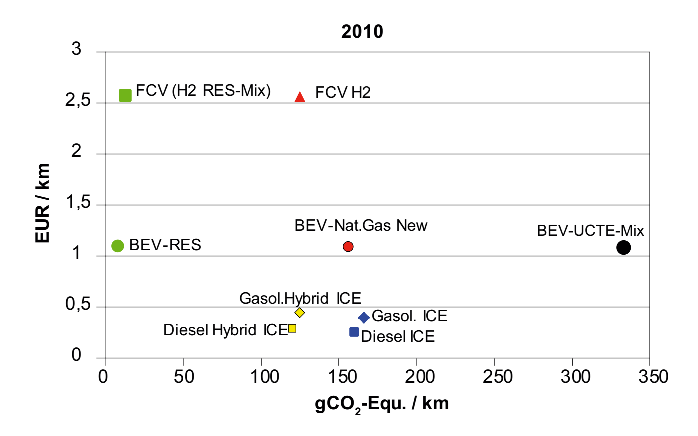


Abbildung 3.39 Vergleich der spezifischen CO_2-Emissionen pro km gefahren und der Mobilitätskosten pro gefahrenem km konventioneller Autos mit Hybrid, Elektro- (BEV) und Brennstoffzellenfahrzeugen im Jahr 2010

Figure 3.39 Comparison of the specific CO_2-emissions per km driven and the costs per km driven of convential cars with hybrid, electro and fuel cell cars in 2010

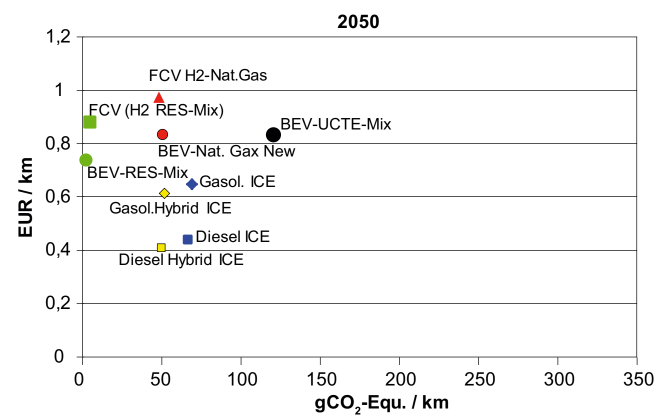


Abbildung 3.40 Vergleich der spezifischen CO_2-Emissionen pro gefahrenem km und der Mobilitätskosten pro km gefahren konventioneller Autos mit Hybrid, Elektro- (BEV) und Brennstoffzellenfahrzeugen im Jahr 2050

Figure 3.40 Comparison of the specific CO_2 emissions per km driven and the costs per km driven of convential cars with hybrid, electro and fuel cell cars in 2050

Hindernis für eine weitere Verbreitung sind allerdings die wesentlich höheren Kosten, vor allem bei den Investitionen.

Ein Vergleich zwischen konventionellen Pkw mit Antrieb basierend Hybrid, Elektro- (BEV) oder Brennstoffzelle bezüglich der spezifischen CO_2-Emissionen pro km und der Mobilitätskosten pro km ist in Abbildung 3.39 dargestellt. Fahrten mit konventionellen Pkw ist am billigsten, weist aber die höchsten CO_2-Emissionen per km auf. Hybridautos und Erdgasautos haben geringfügig höhere Kosten aber erkennbar niedrigere Emissionen. Diese Fahrzeugtypen können als Überbrückungstechnologien eingestuft werden. In Bezug auf Emissionen sind Elektro- (BEV) und Brennstoffzellenfahrzeuge basierend auf Strom oder Wasserstoff von erneuerbarer Energieträgern die absolut günstigste Option Allerdings sind diese derzeit bezüglich der Kosten noch nicht wettbewerbsfähig.

Abbildung 3.40 zeigt den korrespondierenden Vergleich für 2050. Die wichtigsten Erkenntnisse aus dieser Abbildung sind dass, wenn die entsprechenden Lernprozesse realisiert werden und eine CO_2-Steuer für Kraftstoffe eingeführt wird, Elektro- (BEV) und Brennstoffzellenfahrzeugen im Jahr 2050 wirtschaftlich mit konventionellen konkurrieren könnten.

Bewertung der Potenziale neuer Technologien

Aus den verschiedenen Studien lassen sich für Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeuge die folgenden Erkenntnisse ableiten: Bis 2020 wird keine dieser Technologien quantitativ eine Rolle spielen und reine Elektro- bzw. Brennstoffzellenfahrzeuge werden in Summe bis 2020 einen Anteil von ca. 1 % der Fahrzeugflotte erreichen. Lediglich für Hybridfahrzeuge wird der Marktanteil höher sein. Allerdings ist es wichtig, in Bezug auf die Infrastruktur für die Zeit nach 2020 diese Fahrzeuge schon heute zumindest prinzipiell bei der Planung miteinzubeziehen.

Bewertung der Potenziale erneuerbarer Energieträger

Das dynamische Potenzial alternativer Energieträger in Österreich bis 2050 basierend auf nichtkonventionellen biogenen Rohstoffen wurde in dem Projekt ALTETRÄ (Ajanovic et al., 2012a) analysiert. Demzufolge existiert für EET basierend auf nichtkonventionellen biogenen Rohstoffen ein merkliches aber auch deutlich beschränktes zusätzliches Potenzial, das maximal beim Vierfachen des heute genutzten liegt (vgl. Abbildung 3.41).

Um dieses zusätzliche Potenzial aus gesellschaftlicher Sicht optimal zu erschließen, ist die Einführung einer CO_2-spezifischen Steuer auf alle Energieträger, welche die heutige MöSt ersetzt, eine elegante und effiziente Lösung (vgl. auch Abschnitt 3.2.7).

Es ist deutlich zu sehen, dass nach ca. 2020 Biofuels der 2. Generation – sofern entsprechende Lerneffekte bezüglich der Kosten erzielt werden und die Technologien technische Reife erreicht haben – zu einer deutlichen Steigerung der Nutzung dieser vor allem auf Lignozellulose basierenden Rohstoffe führen können. Dies wird allerdings nur dann re-

alisiert, wenn die beschriebene CO_2-spezifische Steuer auf alle Energieträger implementiert wird. Damit – vor allem mit Biodiesel auf FT-Basis – können die biogenen Rohstoffe auch effizienter genutzt und höhere CO_2-Einsparungen realisiert werden.

Maßnahmen C: Verkehrsplanung / „Soft tools im Verkehr" zur Reduktion der THG-Emissionen in Österreich

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten möglichen Maßnahmen im Bereich „Soft tools im Verkehr" zur Reduktion der THG-Emissionen dokumentiert.

Physische Mobilität von Menschen

Externe Mobilität ist ein intrinsisches Mittel zur Erfüllung von menschlichen Bedürfnissen, die nicht zu Hause erfüllt werden können. In unserer modernen Gesellschaft sind dies Ausbildung, Arbeit, Geschäftstätigkeit und Freizeit (soziale Kontakte, Erholung, Erlebnis, Sport und Bewegung etc.). Forschungsergebnisse der letzten etwa 30 Jahre legen u. a. den Schluss nahe, dass menschliche Wege von einer Stabilität der durchschnittlichen Reisezeitbudgets in der Gesellschaft dominiert werden (Zahavi und Talvitie, 1980; Hupkes, 1982; Schäfer, 2000; Metz, 2008). Aus der Erkenntnis der großteils stabil bleibenden Reisezeiten folgt die Erkenntnis, dass durch Erhöhung der Reisegeschwindigkeit keine Verkürzung von Wegdauern sondern eine Verlängerung der zurückgelegten Entfernungen erreicht wird. Im Zuge der Motorisierung führte dies zu höherem Einsatz von fossiler Energie. Die Wahl des Verkehrsmittels ist unter anderem stark geprägt durch die Erreichbarkeit der Verkehrsmittel, die Leichtigkeit eines gehenden Zu- und Abganges, der Zuteilung von Raum und Prioritäten für das Verkehrsmittel sowie weiterer Faktoren. Die Resultate von Peperna (1982) haben dem Gehen an sich und als Zu- / Abgangsmodus besondere Bedeutung zuerkannt. Sie legen nahe, dass die Fußgeherattraktivität von Straßenräumen und Stadtoberflächen ein wichtiger Stellparameter für das Verkehrssystem ist. Eine qualitativ hochwertige, Fußwege favorisierende Gestaltung der urbanen Verkehrsflächen stellt daher eine wichtige Vorbedingung umweltschonender Transportregime dar. Generell kann festgehalten werden, dass eine höhere Siedlungsdichte die Versorgung mit Alltagsbedürfnissen in Gehentfernung leichter ermöglicht.

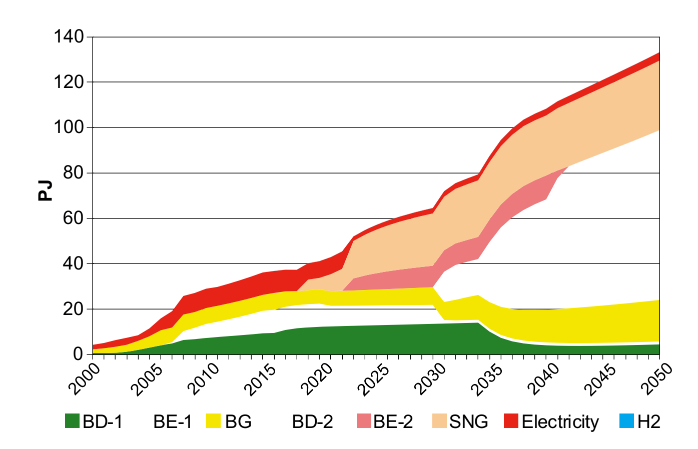


Abbildung 3.41 Das dynamische Potenzial alternativer Energieträger in Österreich bis 2050 basierend auf nichtkonventionellen biogenen Rohstoffen. Quelle: ALTETRÄ, Ajanovic et al., (2012a)

Figure 3.41 The dynamic potential of alternative energy sources in Austria until 2050 based on non conventional biogene raw materials. Source: ALTETRÄ, Ajanovic et al. (2012a)

Möglichkeiten zukünftigen Mobilitätsmanagements

Die gesetzlichen, finanziellen und städtebauerischen Rahmenbedingungen der Vergangenheit und auch der Gegenwart haben stark automobilabhängige Mobilitätsformen stimuliert. Sie reflektieren auch die große Trägheit des kombinierten Verkehrs-Siedlungssystems gegenüber großen Veränderungen. Dabei sind viele Initiativen zur Verbesserung der Nachhaltigkeit im Verkehr bereits wirksam oder im Entstehen begriffen.

Mobilitätsmanagement ist so ein Zugang, dort wo die Spielräume der bestehenden Gesetze ausgenutzt werden können, um den Personenverkehr ein Stück weit ökologischer zu gestalten. Mobilitätsmanagement kann dabei auf individueller Ebene bereits bei der Beratung zur Wohnstandortwahl einsetzen, in Bereich von biographischen Brüchen, die zu einer Neuordnung der Gewohnheiten führen (Umzug, Schuleintritt etc.) ansetzen. Mobilitätsmanagement kann auch bei Betrieben, der öffentlichen Verwaltung und Bildungseinrichtungen eingesetzt werden, wo eine bedeutsame Anzahl von Menschen auf einer regelmäßigen Basis angesprochen werden kann. In den letzten zwei Jahrzehnten ist Mobilitätsmanagement zuerst in Pilotprojekten erprobt worden. Nach erfolgreicher Evaluation wurden vom Umweltministerium Förderprogramme ins Leben gerufen, um die Zugangsschwelle zum betrieblichen Mobilitätsmanagement für interessierte Unternehmen und Behörden zu senken sowie um ihnen Unterstützung zu bieten. Zusätzlich wurden Programme für die Verbesserung von kommunaler und regionaler Mobilität initiiert. Die betrieblichen

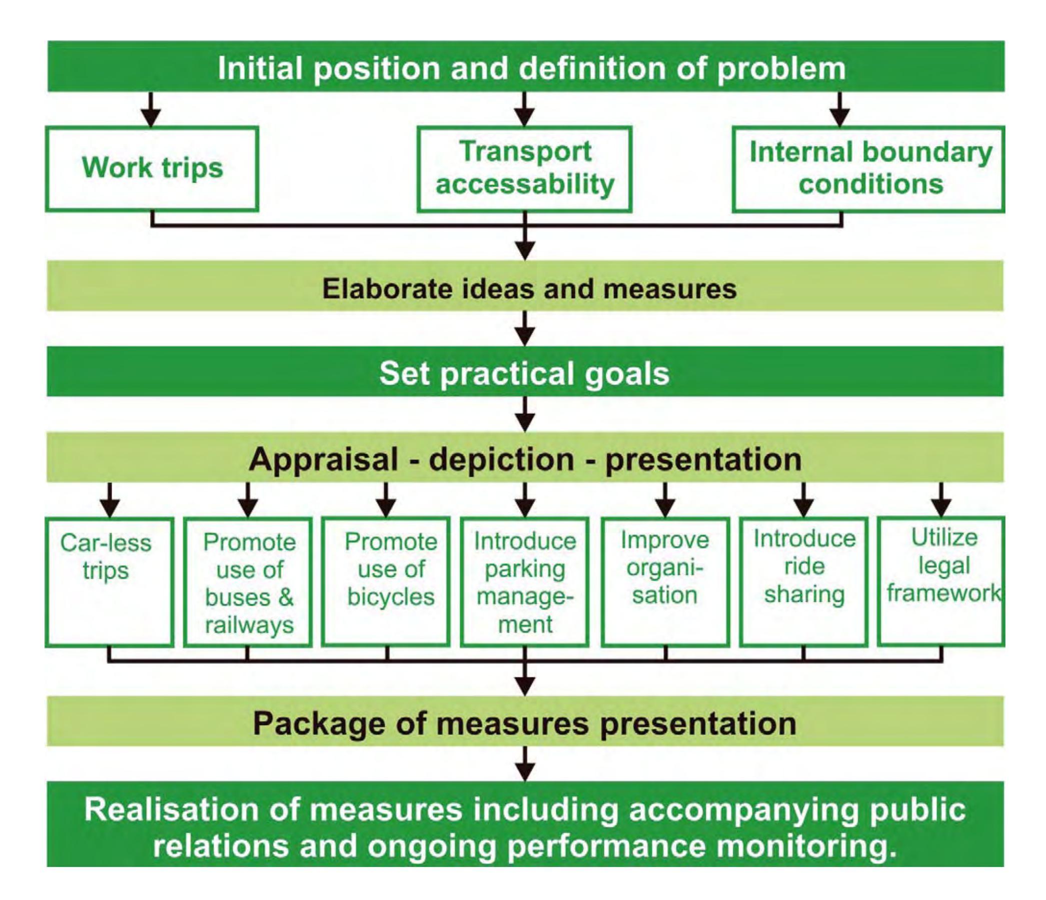


Abbildung 3.42 Bestandteile des Mobilitätsmanagementprozesses. Quelle: Modifiziert nach VCÖ: Rauh et al. (2004)
Figure 3.42 Parts of mobility management processes. Source: Modified from VCÖ: Rauh et al. (2004).

Programme des Mobilitätsmanagments haben sich dabei als sehr erfolgreich erwiesen.

Warum entscheiden sich Betriebe, Mobilitätsmanagement zu machen? Weil sie ihr ökologisches Außenbild verbessern wollen; weil sie sich ökologisch zertifizieren lassen wollen; weil abgestellte Autos den Zugang für KundInnen und LieferantInnen einschränken; weil die automobilfokussierte Mobilitätssituation zu Belegschaftsunmut führt; weil die Bereithaltung kostenlos angebotener Stellplätze zu teuer kommt; weil sich AnrainerInnen über die Verkehrsbelastung beschweren; weil steigende Mobilitätskosten die Gehaltserhöhungen wettmachen sowie aus weiteren Gründen (vgl. Herry et al., 2000).

Mögliche Maßnahmen des Mobilitätsmanagements sind: Stellplatz. B.ewirtschaftung, Car-Pooling, verbesserte und maßgeschneiderte ÖV-Verbindungen und Takte, Verringerung des Stellplatzangebots in Zusammenhang mit Anreizen andere Verkehrsmittel zu benützen, betriebsinterne Wettbewerbe und anderes mehr. Abbildung 3.42 zeigt schematisch den Prozess zur Umsetzung von Mobilitätsmanagement.

Logistik im Güterverkehr

Gemäß der Güterverkehrsstatistik der Statistik Austria (Statistik Austria, 2011) sind 40 % der Fahrten von Güterverkehrsfahrzeugen Leerfahrten. Die hohe Intensität des Straßengüterverkehrs und das hohe Potential für Beladungsverbesserungen legen die Umsetzung von Güterverkehrspolitiken zur Reduktion der spezifischen Emissionen sowie die Verlagerung auf andere Verkehrsträger nahe. Um die CO_2-Intensität zu reduzieren ist es gemäß Leonardi et al. (2004) notwendig den Indikator der Fahrzeugeffizienz Tonnen-km (tkm) pro Massen-km (mkm) zu verbessern. Massen-km setzen sich aus transportiertem Gut und Fahrzeug zusammen.

Die Fahrzeugeffizienz liegt im Schnitt bei 0,36 tkm / mkm mit einer Spannweite von 0,28 tkm / mkm (Lkw < 40 t) bis 0,40 tkm / mkm (Lkw > 40 t). Leonardi et al. (2004) schätzen auch, dass ein Anstieg der Effizienz von 0,36 auf 0,50 tkm / mkm zu einer Emissionsreduktion um 20 % führt.

Zanni et al. (2010) führen einige Beispiele von Straßenverkehrsmaßnahmen und deren Reduktionspotential an.

Fahrertrainings und die Umsetzung von sogenannten „Urban Consolidation Centres" versprechen eine Reduktion des Treibstoffverbrauchs und der CO_2-Emissionen um 10 %. Wenn verbessertes computergesteuertes Routing, Scheduling und Tracking von Gütertransporten eingeführt wird, ist ein Potential von –10 % abrufbar. Werden Reifendruck und Fahrzeugaerodynamik optimiert, sind 30 % Reduktion drinnen. Low-Emission Fahrzeuge und Effizienzmaßnahmen werden mit einem Reduktionspotential von 25 bis 50 % beziffert. Nachdem bei Umsetzung all dieser Maßnahme von keiner linearen Aufsummierung der Einsparpotentiale auszugehen ist, geben die Autoren eine maximale Reduktion von 60 % an.

Maßnahmen D: Möglichkeiten im fiskalischen Bereich (Steuern und Subventionen) zur Reduktion der THG-Emissionen in Österreich

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten möglichen Maßnahmen im fiskalischen Bereich (vor allem Steuern und andere Abgaben aber auch Förderungen) zur Reduktion der THG-Emissionen dokumentiert.

Dazu sei festgestellt, dass Steuern – vor allem auf Kraftstoffe – zwar die dominierende Maßnahme in dieser Kategorie darstellen, darüber hinaus aber eine Fülle weiterer Optionen für ökonomische Maßnahmen und fiskale Steuerungeelemente existiert: Ökosteuern, Fahrzeugkosten (Versicherung), Subventionsabbau, Pendlerpauschalen, Mautgebühren, LKW-Road Pricing, Radverkehrsförderungen usw.

Bevor Verteuerungen (z. B. Erhöhungen von Abgaben) diskutiert werden, ist auf das hohe Ausmaß an kontraproduktiven Subventionen hinzuweisen. Für Österreich werden diese für den Straßenverkehr mit jährlich 5 % des BIP quantifiziert (!) (Steininger und Prettenthaler, 2003; Köppl und Steininger, 2004). In dieser Größenordnung trägt die Allgemeinheit Kosten, die nicht den StraßenverkehrsnutzerInnen direkt weitergegeben werden. Es handelt sich um Subventionen (entweder explizit fiskalisch, oder durch ordnungsrechtliche Regelungen implizit), die aus anderen Gründen eingerichtet wurden und nunmehr verkehrspolitisch kontraproduktiv wirken. Etwa erfordern die Bau- bzw. Garagenordnungen der Länder die Errichtung von PKW-Abstellplätzen bei Neuerrichtung von Wohngebäuden und Firmenanlagen und zwar unabhängig vom tatsächlichen Bedarf oder der Anbindung an öffentliche Verkehrsmittel. Somit wird auch aus Mitteln der Wohnbauförderung die Garagenerrichtung getragen, diese Kosten werden den PKW-NutzerInnen nicht angelastet, wodurch eine de facto Subventionierung des PKW-Verkehrs durch Nicht-NutzerInnen erfolgt. Das verkehrlich kontraproduktive Fördervolumen macht österreichweit 145 bis 175 Mio. €/Jahr aus. Im Zuge der Errichtung der autofreien Mustersiedlung in Wien war dieses Bundesland das erste, das die begründete Aufhebung dieser Bindung nunmehr zulässt. Auch der Ansatz des pauschalierten Kilometergeldes sowohl für Dienstreisen öffentlich Bediensteter als auch als Berechungsgrundlage für die steuerliche Abschreibung ist insofern als kontraproduktive Förderung zu werten, weil die Höhe des Kilometergeldes explizit nicht nur die variablen (zusätzlichen) Kosten abgilt, sondern auch anteilig die Fixkosten des für berufliche Zwecke genutzten privat-PKWs, und somit die Verkehrsmittelwahl deutlich in Richtung Mehr-Nutzung des PKWs verzerrt wird. (Fördervolumen 110 Mio €/Jahr). Die weiteren kontraproduktiven Förderschienen speisen sich aus der Wohnbauförderung und der Raumordnung (sofern diese auf keine verkehrlichen Charakteristiken abstellen; dieses Förderelement macht gesamt bis zu 270 Mio €/Jahr aus), der Pendlerpauschale, der Straßeninfrastruktur, der Übernahme der medizinischen Behandlungskosten nach Unfällen durch die allgemeine Sozialversicherung (und nicht die KFZ-Haftpflicht), sowie die Grundsteuerbefreiung von Verkehrsflächen (Förderelement gesamt bis zu 9,7 Mrd. €/Jahr).

Gebetsroither et al. (2007) stellen die Wirksamkeit der zehn wichtigsten denkbaren verkehrspolitischen Ansätze (ordnungs- und fiskalpolitisch) gegenüber, und kommen vor allem zum Schluss, dass bei der Quantifizierung der Wirkung einer Erhöhung der Mineralölsteuer zwischen einem Effekt der Verkehrsverlagerung, der dadurch im inländischen Verkehr erreicht wird und einem Effekt der über die Veränderung des Treibstoffexports im Tank erreicht wird (Haupteffekt).

Für eine fahrleistungsabhängige Kilometerabgabe (PKW-Road Pricing) im Personenverkehr spricht die Erfassung aller Fahrzeuge in Österreich, im Vergleich zu einer MöSt-Erhöhung das nicht-Auslösen von Ausweichreaktionen im Tankverhalten ins Ausland, sowie die zeit- und damit belastungsabhängige Gestaltbarkeit (je nach technischer Umsetzung). Die Wirksamkeit wurde in mehreren Simulationsstudien klar gezeigt (Kalinowska und Steininger, 2009; Steininger et al., 2007a), wobei vor allem auch herausgearbeitet wurde, dass die Verteilungswirkungen zwar allgemein durchaus progressiv sind (also die reicheren Haushalte einen überproportional großen Anteil der Last tragen und nicht die ärmeren wie vielfach argumentiert), dass es aber „Gefangene" in allen Einkommensklassen gibt, die durch – nicht verkehrsbezogene (!) – Transfers bei der Verfolgung einer solchen Politik zu berücksichtigen sind. (Steininger et al., 2005; Steininger et al., 2007a).

Auch der Übergang auf Dienstleistungskonzepte anstelle des Besitzes von Fahrzeugen (Car-Sharing Konzepte) hat in

Tabelle 3.7 Einfluss verschiedener Arten von fiskalpolitischen Instrumenten auf unterschiedliche Komponenten von Mobilitätsbedarf. Quelle: Ajanovic et al. (2012a); VTPI (2010)

Table 3.7 Influence of different types of fiscal political instruments on the components of mobility supply. Source: Ajanovic et al. (2012a); VTPI (2010)

Type of Impacts	Vehicle Fees	Fuel Price	Fixed Toll	Congestion Pricing	Parking Fee	Transit Fares
Vehicle ownership. Consumers change the number of vehicles they own.	X	X			X	X
Vehicle type. Motorist chooses different vehicle (more fuel efficient, alternative fuel, etc.)	X	X				
Route Change. Traveler shifts travel route.			X	X	X	
Time Change. Motorist shifts trip to off-peak periods.				X	X	
Mode Shift. Traveler shifts to another mode.		X	X	X	X	X
Destination Change. Motorist shifts trip to alternative destination.		X	X	X	X	
Trip Generation. People take fewer total trips (including consolidating trips).		X	X	X	X	X
Land use changes. Changes in location decisions, such as where to live and work.			X		X	X

Österreich bereits eine lange Tradition. Aus den Anfängen als privater Verein (AutoTeilen) übernahm später der größte Fahrzeugimporteur (DenzelDrive) den Vertrieb dieses Konzepts, welcher 2012 durch den Weltmarktführer (ZipCar) aufgekauft wurde. Zu hinterfragen ist bei diesen Konzepten (wie auch bei ähnlichen ohne fixen Standplätze aber größerer Fahrzeugzahl, etwa Car2Go) die Nettowirkung aus (a) verringerter PKW-Nutzung (verglichen mit dem Besitz eines eigenen PKW) und (b) vermehrter Nutzung (durch Personen, die ohne solch ein Konzept gar kein Fahrzeug zur Verfügung hätten). Steininger et al (1996) und Steininger und Novy (1997) belegen in der Auswertung eines Feldversuchs, dass der erste Effekt deutlich überwiegt. Prettenthaler und Steininger (1999) argumentieren, dass das Potenzial in Österreich noch deutlich ausweitbar erscheint.

Für den Güterverkehr wird für Österreich innerhalb einer Kooperation mit der OECD („Environmentally Sustainable Transport") gezeigt, dass auch eine substantielle THG-Emissionsreduktion (–80 % im 40-Jahr-Zeithorizont) ökonomisch durchaus bewältigbar ist, wenn nachfrageseitige und technologische Pfade simultan aktiviert werden (Friedl und Steininger, 2002).

Als ein Instrument wird auch die Ausweitung der LKW-Maut flächendeckend diskutiert. Diese Ausweitung diskutieren Steininger et al. (2012) in den politisch denkbaren Varianten und kommen zum Schluss, dass die Inflationswirkung mit unter 0,15 % vernachlässigbar wäre, die Fahrleistungs- und somit die Emissionsreduktion) bei 2 % liegen würde, dieses Instrument aus Gerechtigkeitsaspekten jedoch simultan mit regionalen Transfers einzurichten wäre, wenn periphere Regionen dadurch nicht schlechter gestellt werden sollen (die sonst eine überproportionale Last zu tragen hätten).

In Bezug auf die Vielzahl von möglichen pricing schemes und fiskalpolitischen Instrumenten auf unterschiedliche Komponenten des Mobilitätsbedarfs gibt Tabelle 3.7 einen Überblick. Dazu sei festgestellt, dass die Effekte dieser verschieden Politiken auf den Energieverbrauch und die CO_2-Emissionen noch nicht voll untersucht wurden, bisherige Erfahrungen aber zumindest ausreichende Erkenntnisse für die groben Effekte erlauben.

Ökonomische Anreize und fiskalische Instrumente im Verkehr können unterschiedliche Effekte bewirken. Fiskalische Instrumente können in erster Linie als Benutzerabgaben zur Abdeckung der Investitionen in die Infrastruktur gesehen werden und in zweiter Linie zur Internalisierung der hohen externen sozialen Kosten des Verkehrs herangezogen werden (z. B. EEA, 2008b). Drittens haben fiskalische Instrumente einen Steuerungseffekt und können zu Verhaltensveränderungen oder zu einer Reduktion der Nachfrage von jenen Verhaltensmuster führen, die hohe externe soziale Kosten verursachen. In der ökonomischen Theorie wird postuliert, dass fiskalische Instrumente, die die sozialen Kosten nachvollziehbar abbilden, immun gegen „Rebound-Effekte" sind. Allerdings, wenn nur eine Kategorie der externen Kosten durch fiskalische Instrumente abgedeckt wird (z. B. THG Emissionen) muss das nicht zwangsläufig auch andere externe Kosten verbessern

(z. B. Staus oder Raumbedarf des motorisierten Verkehrs in Innenstädten).

Kraftstoffsteuern und Carbon Pricing

In Bezug auf Kraftstoffsteuern wird oft argumentiert, diese seien unwirksam, weil die AutofahrerInnen nicht auf Preisänderungen reagieren würden. Gegen dieses Argument und für die Wirksamkeit von Kraftstoffsteuern sprechen die folgenden Argumente:

Der Kraftstoffverbrauch in Europa (wo Kraftstoff praktisch in jedem Land merklich besteuert ist) ist deutlich geringer als in den USA (wo Kraftstoff praktisch nicht besteuert ist); Kraftstoffsteuern in Europa waren ein Grund warum sowohl der Kraftstoffverbrauch als auch die CO_2 Emissionen der PKWs in Europa geringer waren als in den USA (Ajanovic et al., 2011).

Analysen verschiedener Autoren in der Literatur (z. B. Sterner, 2007; Dahl und Sterner, 1991; Dahl, 2012) zeigen, dass langfristige Preiselastizitäten in Größenordnungen zwischen –0.3 und –0.6 liegen und damit zu Energieeinsparungen von 30 % bis 60 % durch die Einführung von Kraftstoffsteuern führen.

Schließlich haben die weltweiten Rückgänge im Erdölverbrauch zu Zeiten hoher Ölpreise vor allem von 1979 bis 1985 auch im Transportsektor gezeigt, dass es eine eindeutige Preissensitivität gibt.

Wir denken, dass diese Argumente ausreichend sind, um die Einführung höherer Kraftstoffsteuern, die im Sinne einer effektiven CO_2-Reduktion Carbon-spezifisch sein sollten, ausreichen.

Fahrzeugbesteuerung und Subventionen

Fahrzeugbesteuerung kann für die Regulierung des Fahrzeugbesitzes herangezogen werden. Nachdem die meisten Infrastruktur- und Sozialkosten durch die Fahrzeugbenutzung verursacht werden, nicht durch den Fahrzeugbesitz, wird die Fahrzeugbesteuerung als suboptimales Steuerungsinstrument angesehen. Eine entsprechend gestaltete Fahrzeugbesteuerung kann jedoch nicht verfügbare „first-best-pricing“ Instrumente erfolgreich abbilden. Eine hohe Fahrzeugbesteuerung limitiert die Fahrdurchdringung. In Dänemark zum Beispiel ist die Fahrzeugbesteuerung höher und der Fahrzeugbesitz niedriger als in den USA. Ein weiteres Beispiel sind Städte und Ballungsräume hoher Dichte, wie etwa Singapur oder Shanghai, die den Fahrzeugbesitz über die Versteigerung von Zulassungen regulieren (GEA, 2012).

Straßenbenutzungsabgaben

Straßenbenutzungsabgaben oder „road pricing“ basieren darauf, dass für die Benützung der Straße die tatsächlich anfallenden Kosten abgedeckt werden, etwa höhere Kosten bei Stau oder niedrigere bei wenig Verkehr. Die Einrichtung von Staugebühren ist eine Form des Mobilitätsmanagement mit dem Ziel den Kraftfahrzeugverkehr zu reduzieren oder auf umweltverträglichere Verkehrsmittel zu verlagern, in Spitzenzeiten im Personen- und Güterverkehr den Stau zu reduzieren, die Fahrzeiten zu verkürzen und Emissionen zu. Bei einer City-Maut würden die Straßenbenützungsabgaben nicht eine Reduktion der Staus bewirken, sondern wären auch eine effiziente Maßnahme um andere externe Effekte, unter Einbeziehung der Luftverschmutzung, der Lärmbelastung, der Unfälle und der THG-Emissionen zu internalisierenDie besten Wirkungen können Straßenbenützungsabgaben in Verbindung mit anderen Maßnahmen wie Verbesserungen im Öffentlichen Verkehr, Bereitstellung von Infrastruktur für den Rad- und Fußgängerverkehr, erreicht werden, um eine modale Verlagerung zu unterstützen. Technisch gesehen führt die kombinierte Anwendung von „push“ Maßnahmen (road pricing) und „pull“ Maßnahmen (Investitionen in ÖV und nicht motorisierten Verkehr) zu Synergien über eine Reduktion der Nachfrageelastizitäten führen, zu reduzierten Opportunitätskosten bei der Benützung von PKWs und zur Steigerung der allgemeinen Wohlfahrt beitragen. Eine aktive Kommunikation und die Einbeziehung der EntscheidungsträgerInnen sind für den Erfolg von Straßenbenutzungsabgaben entscheidend und muss wirksam angewendet werden um Unterstützung zu bekommen und die Bewusstseinsbildung zu fördern (GEA, 2012). Weitere umfassende Analysen sind in Steininger et al. (2005), Kalinowska und Steininger (2009)) dokumentiert.

Sowohl Gestaltungs- als auch Verteilungseffekte spielen eine wichtige Rolle im politischen Erfolg von road pricing und City-Maut. In Hong Kong wurde die Idee einer City-Maut aufgegeben, da die Bevölkerung unter anderem befürchtete, dass ihre Bewegungen aufgezeichnet werden könnten. Die City-Maut erfährt wahrscheinlich eine höhere Akzeptanz, wenn die Einnahmen für alternative Verkehrsmittel wie Öffentlicher Verkehr oder nicht motorisierter Verkehr verwendet werden und damit die Opportunitätskosten der VerkehrsteilnehmerInnen reduziert werden. Im Gegensatz zu Stockholm wurde eine City-Maut in Edinburgh abgelehnt. AutofahrerInnen waren vehement gegen eine City-Maut und betonten die hohen Kosten der City-Maut während weder AutofahrerInnen noch BenutzerInnen des Öffentlichen Verkehrs die Maßnahme aufgrund der zukünftigen Vorteile befürworteten (Verlustaversi-

on). In diesem Fall fehlte eine solide Kommunikationsstrategie mit klaren Zielen. Andere entscheidende Erfolgskriterien beinhalten die Einrichtung einer Umsetzungsagentur und die Einbeziehung von (lokalen) Testimonials in den Prozess. Die Gestaltung sollte Rücksicht auf den räumlichen Anwendungsbereich und die WählerInnen nehmen. Beides, Beratung und Gestaltung sind für den Prozess notwendig und, dementsprechend, sollte das Projekt einfach gehalten sein (GEA, 2012).

3.2.6 Zentrale Maßnahmen für Adaptation und Mitigation

Der Verkehrssektor war in Österreich und in der EU insgesamt in den letzten Jahren der Sektor mit der ungünstigsten Entwicklung der THG-Emissionen. Verschiedene Maßnahmen, insbesondere regulative Instrumente wie Standards für CO_2-Emissionen von PKW, Beimischung von Bio-Kraftstoffen, aber auch Maßnahmen im Rahmen von Mobilitätsmanagement (klima:aktiv mobil, www.klimaaktiv.at) haben zu einer leichten Reduktion der CO_2-Emissionen in Österreich seit 2005 geführt, die aber bei weitem nicht ausreichend sind, um mittel- und langfristige Ziele zu erreichen. 2010 war wiederum ein leichter Anstieg um 3 % im Vergleich zu 2009 fest zu stellen (BMLFUW, 2012).

Eine substantielle Reduktion der THG-Emissionen des Verkehrs bis 2050 wird nur durch ein optimiertes Politikportfolio ermöglicht. Dieses hat als zentrales Ziel – neben der Verkehrsvermeidung (Reduktion der zurückgelegten Distanz) – den Umstieg auf effiziente Verkehrsträger (öffentlichen Verkehr) sowie den Einsatz von „Zero-Emission-Fahrzeugen“ und regenerativer Energie. Ein zentraler Aspekt dieses Portfolios sind geeignete ökonomische Rahmenbedingungen. Neue Preis- (für den motorisierten Individualverkehr) und Tarifsysteme (für den öffentlichen Verkehr) sind notwendig, um Anreizsysteme für einen Umstieg vom motorisierten Individualverkehr auf den öffentlichen Verkehr und auf Zero-Emission-Fahrzeuge zu fördern.

Mehrere Arbeiten befassen sich mit den unterschiedlichen Maßnahmen und (politischen) Instrumenten (u. a. Hausberger und Schwingshackl, 2011; Streicher et al., 2010; Ajanovic et al., 2011).

Als eine wichtige Gruppe an Maßnahmen und Instrumenten werden Maßnahmenbündel aus fiskalischen Instrumenten angeführt. In Bezug auf neue Preissysteme für den motorisierten Individualverkehr kommen alle untersuchten Studien zu ähnlichen Prioritäten.

- Vorrangig eine höhere bzw. über die nächsten Jahrzehnte kontinuierlich ansteigende Kraftstoffsteuer. In diesem Kontext ist anzumerken, dass Österreich diesbezüglich – mit geringeren Steuern (Mineralölsteuer – MöSt) im Vergleich zu den Nachbarländern – ohnehin einen Nachholbedarf hat. Angedacht wird auch die Umstellung der MöSt auf eine CO_2-basierte Abgabe.
- Eine Ergänzung der MöSt durch eine verbrauchsabhängige Zulassungssteuer, die den Trend zu größeren Fahrzeugen aufgrund besserer Effizienz mindern soll, sowie eine Ergänzung durch „Road-Pricing“ in den großen Städten.
- In Bezug auf Vergünstigungen ist die bevorzugte Behandlungen von Dienstfahrzeugen rigoros zu beseitigen. Jedenfalls soll hier der steuerliche Anreiz deutlich zugunsten kleinerer Fahrzeuge und des öffentlichen Verkehrs verschoben werden (siehe auch: Mobilitätsmanagement).
- Die Pendlerpauschale, die in der derzeitigen Form mitunter ein Motor der Ausdehnung der Siedlungsräume rund um die Ballungsräume ist, ist zu streichen, bzw. aufkommensneutral mit Steuerbegünstigungen für niedrige Einkommensklassen sowie mit Anreizen für die ÖV-Nutzung umzugestalten.
- Entwicklung neuer Konzepte und Intensivierung der Parkraumbewirtschaftung.
- Vereinfachung der Tarife im öffentlichen Verkehr sowie systematischer Ausbau der Anreizsysteme für Zeitkarten.

Ein Großteil der Arbeiten geht von einer deutlichen Wirkung der Preissignale aus, die bei einer Verteuerung der energie- und THG-intensiven Mobilitätsformen zu einer Reduktion der Fahrleistung (zurückgelegt Kilometer) und / oder zur Verlagerung auf andere Verkehrsmittel (nicht motorisierter Verkehr, Öffentlicher Verkehr) führen wird. Unsicher ist jedoch die Auswirkung bei der Änderung der Preissignale in der Zeitachse: Führt eine rasche Änderung nicht zur Armutsgefahr bestimmter Bevölkerungsgruppen und / oder zum Ausschluss an der Teilnahme bestimmter Aktivitäten für diese Bevölkerungsgruppen? Führt eine langsame Änderung der Preissignale nicht zu einer Gewöhnung an hohe Preise für bestimmte Mobilitätsformen und somit zu einem geringeren Effekt als erwünscht und / oder angenommen – zumindest bei ausgewählten Bevölkerungsgruppen? Diese Fragen werden nur ansatzweise diskutiert; hier besteht noch Klärungs- bzw. Forschungsbedarf.

Als weitere bedeutende Gruppe an Maßnahmen und Instrumenten wird ein Maßnahmenbündel zur Verkehrsverlagerung im Personenverkehr angeführt:

In Bezug auf raumplanerische und regulierende Maßnahmen sind generelle flächensparende und Siedlungsdichten

erhöhende Maßnahmen sowie Maßnahmen der Funktionsmischung umzusetzen. Bauland darf nur noch dort gewidmet werden, wo eine adäquate Erreichbarkeit mit dem öffentlichen Verkehr gegeben ist. Herstellung der Chancengleichheit des öffentlichen Verkehrs durch Siedlungsstrukturen der kurzen Wege, niedrige Geschwindigkeiten und Funktionsmischung sowie adäquate Finanzierung.

Weitere wichtige Maßnahmen sind:

- Ausbau und Attraktivierung des ÖV.
- Ausbau multimodaler Verkehrssysteme und -knoten, (vgl. Steininger et al., 2007b).
- Mobilitätsmanagement in Betrieben.
- Förderung des Radverkehrs (Bau neuer Strecken bzw. Lückenschlüsse in den Radverkehrsnetzen, Fahrradabstellplätze).
- Informationssysteme
- Öffentlichkeitsarbeit

Die relativ allgemeine Maßnahme „Ausbau und Attraktivierung des Öffentlichen Verkehrs“ setzt, insbesondere auch im suburbanen und ländlichen Raum, eine Festlegung von festgelegten Ausbau- oder Qualitätskriterien voraus. Daraus wäre auch eine „Mobilitätsgarantie ohne eigenem PKW“ ableitbar, die bestimmte Qualitätskriterien je nach räumlicher Situation enthalten könnte (bis hin zu kommunalen PKWs). Hierzu gibt es derzeit kaum fundierte Arbeiten, ein entsprechender Forschungs- und Klärungsbedarf zur Vertiefung dieser Frage ist gegeben.

Als weitere bedeutende Gruppe an Maßnahmen und Instrumenten wird ein Maßnahmenbündel zur Verkehrsverlagerung im Güterverkehr angeführt:

- Maßnahmen zur Verbesserung der Logistik, speziell der intermodalen Transportmittelnutzung.
- Erhöhung der Auslastung der Transportmittel (gewichts- und volumsmäßig).
- Attraktivierung der Nutzung von Bahn und Binnenschiff (Donau) durch Ausbau der Bahn- (auch von Anschlussbahnförderungen) und Schifffahrtinfrastruktur (Hafen).

Eine effizientere KFZ Nutzung als Maßnahmenpaket sieht vor:

- Einführung einer Geschwindigkeitsbeschränkung von 100 / 110 km / h am hochrangigen Netz (mit derzeitiger gültiger Geschwindigkeitsbeschränkung von 130 km / h bzw. die höher als 110 km / h ist).
- Kontinuierliche Steigerung der Effizienz von Fahrzeugen, so dass das EU-Ziel für die Flottenemissionen von 87 g / km in 2020 von der österreichischen PKW-Flotte unterboten wird.

Fahrzeuge mit neuen Emissionsstufen und besonders verbrauchsgünstige Nutzfahrzeuge sollen bei Maut oder anderen Abgaben bevorzugt werden. Eine dazu nötige Normierung der Verbrauchsangaben für Nutzfahrzeuge ist auf EU-Ebene aktiv zu unterstützen.

Der letzte große Block an Maßnahmen umfasst den Bereich „effizientere Technologie“:

- Erhöhte Anwendung alternativer Kraftstoffe und steigender Anteil von elektrisch betriebenen PKWs und LNF.
- Die spezifischen CO_2-Emissionen der „Bio-Kraftstoffe“ sollen in der gesamten WTT-Erzeugungskette soweit reduziert werden, dass sie bis 2020 70 % weniger als fossile Kraftstoffe emittieren; Nachhaltigkeitskriterien für Biokraftstoffe sind anzuwenden.
- Die Relevanz alternativer Kraftstoffe – vor allem von Bio-Kraftstoffen, Wasserstoff und Erdgas – wird ebenso wie jene alternativer Antriebssysteme – vor allem reiner E-Fahrzeuge und Brenstoffzellenantriebe – zumindest bis 2030 in moderatem Rahmen bleiben. Daher sind die davor beschriebenen Maßnahmen kurz- und mittelfristig die wesentlichen Instrumente zur Senkung des Energieverbrauches und der CO_2-Emissionen im Verkehrssektor.
- Da eine Elektrifizierung im Straßengüterverkehr derzeit nicht sinnvoll darstellbar ist, stellen Biokraftstoffe in diesem Sektor, sowie bei mobilen Maschinen, derzeit die wesentliche Alternative dar.

3.3 Anforderungen an Forschung und Entwicklung
3.3 Further research needs

Forschung, Technologieentwicklung und Innovation wird eine zentrale Rolle bei den notwendigen Veränderungsprozessen in allen Aktionskategorien spielen. Verbesserte bzw. oftmals völlig neue Technologien sind gefragt. Aber auch ein tieferes Verständnis der Ursachen und Folgen, Grundlagen für neue oder verbesserte Zukunftsstrategien, sowie begleitende Forschung zu Veränderungsprozessen sind wichtige Beiträge der Forschung.

Das wurde in Österreich sowohl in der Strategie der Bundesregierung für Forschung, Technologie und Innovation

verankert als auch vom Rat für Forschung und Technologieentwicklung so gesehen, der in seiner publizierten Energieforschungsstrategie den Anspruch für die Energieforschung hoch ansetzt: „Making the Zero Carbon Society Possible". In dieser Strategie werden auch prioritäre Technologiebereiche genannt, die für eine zukunftsfähige Energieentwicklung erforderlich sind:

- Steigerung der Energieeffizienz (Gebäude, Endverbrauch, Industrie)
- Nachhaltige Mobilitätssysteme
- Erneuerbare Energieträger
- Verbesserte Energieverteilung und -speicherung (Smart Grids)
- Smart Cities, als Beispiel der verbraucherseitigen Systemintegration

Für eine wirklich erfolgreiche Umsetzung der Forschungsergebnisse sind alle Phasen des komplexen Innovationsprozesses im Auge zu behalten. Zum einem sind für riskante „emerging technologies" ausreichend Grundlagenforschung zur Verfügung zu stellen. Andererseits ist oft mit einem erfolgreichen Pilotprojekt noch kein Marktantritt gewährleistet. Es droht nach erfolgreicher Entwicklung und vor der Markterschließung die kritische Phase des „Tal des Todes", die mit entsprechenden Maßnahmen überbrückt werden muss. Entsprechende Sicherheiten bei weiteren Investitionen, geeignete Rahmenbedingungen sowie Impulse durch die öffentliche Hand als Beschaffer (precommercial public procurement) können hier eine entscheidende Rolle spielen. Aber auch begleitende Forschung in Einführungsphasen in Form von sogenannten „Living Labs" kann eine sichere Markteinführung gewährleisten.

Doch nur Technologiefelder zu entwickeln ist zu wenig. Ein umfassender Wandel erfordert auch die Umgestaltung des Gesamtsystems. Das heißt, die unterschiedlichen Sektoren und Technologiesysteme sind so in ein Gesamtsystem zu integrieren und zu vernetzen, dass ein Gesamtoptimum im Sinne der Zielsetzungen erreicht wird Besonders im Zusammenhang mit der Volatilität von erneuerbaren Energieträgern, aber auch die zeitlich sehr unterschiedlichen Bedarfsverläufe erfordern Flexibilität und Speicherfähigkeit des Gesamtenergiesystems. Die erforderliche „Smartness" der Systeme wird durch verstärkte Integration von IKT-Lösungen gewährleistet. Daraus resultieren Forschungsfragestellungen im Bereich der Elektrizität wie z. B. Smart Grids, Building to Grids oder auch die Verbindung zu anderen Energieträgern, wie bei Power to Gas.

Systemische Veränderungen benötigen technologische Entwicklungen, soziale Veränderungen und partizipative Prozesse, die durch FTI-Maßnahmen maßgeblich unterstützt werden können. Um entsprechende Effekte zu erzielen erscheint eine deutliche Erweiterung der Forschungsaktivitäten um insbesondere integrativ und fachübergreifend durchgeführte, längerfristige Forschungs- und Technologieschwerpunkte sinnvoll und geboten. Sie wären im günstigen Fall von mehreren Ministerien bzw. der Bundesregierung zu tragen.

Die Klima-, Energie- und Ressourcenfrage ist eine gesellschaftliche Herausforderung, die uns sicher über mehrere Jahrzehnte beschäftigen wird. Daher ist besonders im FTI-Bereich auf langfristige Strategien und kontinuierliche Budgetierungen zu achten. Insbesondere beim Aufbau von wissenschaftlichen Humanressourcen und Technologieführerschaften ist dies von Bedeutung.

Neben thematischen Forschungs- und Technologieprogrammen sind auch Förderungen von Forschungsinfrastruktur, Unterstützung der internationalen Zusammenarbeit sowie neue Schwerpunkte in der Grundlagenforschung erforderlich. Auf ein ausgewogenes Verhältnis von Grundlagenforschung, technologischer Forschung und systemorientierter Transitionsforschung ist Bedacht zu nehmen.

Zur effektiven Umsetzung der gewonnen Erkenntnisse ist auf einen effizienten Wissenstransfer (unter Anwendung des Open Access Approach), auf Verbesserungen im Ausbildungsbereich sowie geeignete innovationsfördernde Rahmenbedingungen zu achten.

Wichtige Fragestellungen können nur in europäischer Zusammenarbeit gelöst werden. Dies erfordert verstärkte internationale Zusammenarbeit, nicht nur auf Projektbasis sondern auch im Sinne eines gemeinsamen Forschungsraums auf Ebene der Programme und Fördereinrichtungen

Von Seiten der Förderstruktur war der 2007 geschaffenen Energie- und Klimafonds, der interministeriell und Innovationsphasen übergreifend arbeitet, eine international positiv bewertete Maßnahme, die eine deutliche Beschleunigung der Innovationen im Bereich der Energie- und Mobilitätstechnologien bewirken kann. Österreich hat in einigen Bereichen bereits eine international anerkannte Vorreiterrolle erlangt, die eine gute Basis für wirkungsvolle Umsetzungen und dem weiteren Erschließen globaler Märkte ist.

3.4 Literaturverzeichnis
3.4 References

Ajanovic, A., Haas, R., Bunzeck, I., van Bree, B., Furlan, S., Toro, F., et al., 2011. Alter-motive: final report.

Ajanovic, A., Dahl, C., Schipper, L., 2012a. Modeling transport (energy) demand and policies – an introduction. Energy Policy 41, 3–16.

Ajanovic, A., Schipper, L., Haas, R., 2012b. The impact of more efficient but larger new passenger cars on energy consumption in EU-15 countries. Energy 48, 346–355. doi:10.1016/j.energy.2012.05.039

Ajanovic, A., Haas, R., Beermann, M., Jungmeier, G., Zeiss, C., 2012c. ALTETRÄ-Perspectives for Alternative Energy Carriers in Austria up to 2050.

Ajanovic, A., Haas, R., 2012d. Effective CO2 Reduction Policies for Passenger Car Transport based on Evidence from Selected OECD Countries, IAEE International Conference, Perth, Australia, 24-27 June.

Auer, H.,2010. Energy-Trend, Im Auftrag der APG, EEG Wien.

Alakangas, E., Heikkinen, A., Lensu, T., Vesterinen, P., 2007. Biomass fuel trade in Europe Summary Report (EUBIONET II project No. VTT-R-03508-07). VTT Technical Research Centre of Finland,, Jyväskylä, Finland.

Bachner, G., Bednar-Friedl, B., Birk, S., Feichtinger, G., Gobiet, A., Gutschi, C., Heinrich, G., Kulmer, V., Leuprecht, A., Prettenthaler, F., Rogler, N., Schinko, T., Schüppel, A., Stigler, H., Themeßl, M., Töglhofer, C., Wagner, T., 2013. Impacts of Climate Change and Adaptation in the Electricity Sector - The Case of Austria in a Continental European Context (EL.ADAPT) (Wegener Center Scientific Report No. 51-2013). Wegener Center Verlag, Graz.

Bednar-Friedl, B., Koland, O., Steininger, K. W., 2011. Urban sprawl and policy responses: a general equilibrium analysis of residential choice. Journal of Environmental Planning and Management 54, 145–168. doi:10.1080/09640568.2010.502766

Bundesfinanzgesetz, 2012. Bundesgesetz über die Bewilligung des Bundesvoranschlages für das Jahr 2013 (Bundesfinanzgesetz 2013 - BFG 2013) samt Anlagen.

BFW (Ed.), 2011. Waldinventur 2007/2009, BFW Praxisinformation. Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW), Wien.

BgBl, 2003. II Nr. 508/2002: Verordnung des Bundesministers für Wirtschaft und Arbeit, mit der Preise für die Abnahme elektrischer Energie aus Ökostromanlagen festgesetzt werden.

BgBl, 2006. I Nr. 105/2006: Bundesgesetz, mit dem das Ökostromgesetz, das Elektrizitätswirtschafts- und -organisationsgesetz und das Energie-Regulierungsbehördengesetz geändert werden (Ökostromgesetz-Novelle 2006).

BgBl, 2006. II Nr. 401/2006: Verordnung des Bundesministers für Wirtschaft und Arbeit, mit der Preise für die Abnahme elektrischer Energie aus Ökostromanlagen auf Grund von Verträgen festgesetzt werden, zu deren Abschluss die Ökostromabwicklungsstelle in den Kalenderjahren 2006 und 2007 verpflichtet ist (Ökostromverordnung 2006).

BgBl, 2008. II Nr. 59/2008: Verordnung des Bundesministers für Wirtschaft und Arbeit, mit der Preise für die Abnahme elektrischer Energie aus Ökostromanlagen auf Grund von Verträgen festgesetzt werden, zu deren Abschluss die Ökostromabwicklungsstelle im Kalenderjahr 2008 verpflichtet ist (Ökostromverordnung 2008).

BgBl, 2008. I Nr. 114/2008: Bundesgesetz, mit dem das Ökostromgesetz geändert wird (2. Ökostromgesetz-Novelle 2008).

BgBl, 2009. II Nr. 53/2009: Verordnung des Bundesministers für Wirtschaft, Familie und Jugend, mit der Preise für die Abnahme elektrischer Energie aus Ökostromanlagen auf Grund von Verträgen festgesetzt werden, zu deren Abschluss die Ökostromabwicklungsstelle im Kalenderjahr 2009 verpflichtet ist (Ökostromverordnung 2009).

BgBl, 2010. II Nr. 42/2010: Verordnung des Bundesministers für Wirtschaft, Familie und Jugend, mit der Preise für die Abnahme elektrischer Energie aus Ökostromanlagen auf Grund von Verträgen festgesetzt werden, zu deren Abschluss die Ökostromabwicklungsstelle bis Ende des Jahres 2010 verpflichtet ist (Ökostromverordnung 2010 - ÖSVO 2010).

BgBl, 2011. II Nr. 25/2011: Verordnung des Bundesministers für Wirtschaft, Familie und Jugend, mit der Preise für die Abnahme elektrischer Energie aus Ökostromanlagen auf Grund von Verträgen festgesetzt werden, zu deren Abschluss die Ökostromabwicklungsstelle im Jahr 2011 verpflichtet ist (Ökostromverordnung 2011 - ÖSVO 2011).

BgBl, 2011. II Nr. 471/2011: Verordnung des Bundesministers für Wirtschaft, Familie und Jugend, mit der Preise für die Abnahme elektrischer Energie aus Ökostromanlagen auf Grund von Verträgen festgesetzt werden, zu deren Abschluss die Ökostromabwicklungsstelle im Jahr 2012 verpflichtet ist (Ökostromverordnung 2012 - ÖSVO 2012).

BgBl, 2012. I Nr. 103/2012: Bundesgesetz über die Bewilligung des Bundesvoranschlages für das Jahr 2013 (Bundesfinanzgesetz 2013 - BFG 2013) samt Anlagen.

BgBl, 2012. II Nr. 307/2012: Verordnung des Bundesministers für Wirtschaft, Familie und Jugend, mit der die Einspeisetarife für die Abnahme elektrischer Energie aus Ökostromanlagen auf Grund von Verträgen festgesetzt werden, zu deren Abschluss die Ökostromabwicklungsstelle ab 1. Juli 2012 bis Ende des Jahres 2013 verpflichtet ist (Ökostrom-Einspeisetarifverordnung 2012 – ÖSET-VO 2012).

Bliem, M., Friedl, B., Balabanov, T., Zielinska, I., 2011. Energie [R] evolution Österreich 2050 (Projektbericht; Studie im Auftrag von EVN, Greenpeace Zentral- und Osteuropa und Gewerkschaft vida). Institut für Höhere Studien (IHS), Wien.

BMLFUW, 2007. Anpassung der Klimastrategie Österreichs zur Erreichung des Kyoto-Ziels 2008-2012. Vorlage zur Annahme im Ministerrat am 21. März 2007. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.

BMLFUW, 2010a. Nationaler Gewässerbewirtschaftungsplan 2009 – NGP 2009 (BMLFUW-UW.4.1.2/0011-I/4/2010). Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.

BMLFUW, 2010b. Auf dem Weg zu einer nationalen Anpassungsstrategie (Arbeitspapier, 2. Entwurf, Stand Oktober 2010). Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.

BMLFUW, 2011. Kriterienkatalog Wasserkraft (Entwurf, Stand 11.4.2011). Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.

BMLFUW, 2012. Fortschrittsbericht nach §6 des Klimaschutzgesetztes, Wien.

BMVIT, 2011. Ausbauplan Bundesverkehrsinfrastruktur 2011–2016. Wien.

BMVIT, 2011a. Ausbauplan Bundesverkehrsinfrastruktur 2011-2016, Wien: Käfer, A., Steininger, K., Axhausen, K., Burian, E.,

Clees, L., Fritz, O., Fürst, B., Gebetsreuther, B., Grubits, C., Huber, P., Kurzmann, R., Molitor, R., Ortis, G., Palme, G., Peherstorfer, N., Pfeiler, D., Schönfelder, S., Siller, K., Streicher, G., Thaller, O., Wiederin, S., Zakarias, G., 2009. Verkehrsprognose Österreich 2025+, Teil 2, Demographie und Wirtschaft (Endbericht), Wien.
BMVIT, 2011b. Ausbauplan Bundesverkehrsinfrastruktur 2011-2016, Wien: Käfer, A., Steininger, K., Axhausen, K., Burian, E., Clees, L., Fritz, O., Fürst, B., Gebetsreuther, B., Grubits, C., Huber, P., Kurzmann, R., Molitor, R., Ortis, G., Palme, G., Peherstorfer, N., Pfeiler, D., Schönfelder, S., Siller, K., Streicher, G., Thaller, O., Wiederin, S., Zakarias, G., 2009. Verkehrsprognose Österreich 2025+, Teil 4, Ergebnisse Personenverkehr (Endbericht), Wien.
BMVIT, 2011c. Ausbauplan Bundesverkehrsinfrastruktur 2011-2016, Wien:Käfer, A., Steininger, K., Axhausen, K., Burian, E., Clees, L., Fritz, O., Fürst, B., Gebetsreuther, B., Grubits, C., Huber, P., Kurzmann, R., Molitor, R., Ortis, G., Palme, G., Peherstorfer, N., Pfeiler, D., Schönfelder, S., Siller, K., Streicher, G., Thaller, O., Wiederin, S., Zakarias, G., 2009. Verkehrsprognose Österreich 2025+, Teil 5, Ergebnisse Güterverkehr (Endbericht), Wien.
BMWFJ, 2010. Nationaler Aktionsplan für Erneuerbare Energie. Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, Wien.
CIPRA International, 2010. Raumplanung im Klimawandel (ein Hintergrundbericht der CIPRA, compact Nr. 02/2010). CIPRA International, Schaan.
Dahl, C., Sterner, T., 1991. Analysing gasoline demand elasticities: a survey. Energy economics 13, 203–210. doi:http://dx.doi.org/10.1016/0140-9883(91)90021-Q
Dahl, C.A., 2012. Measuring global gasoline and diesel price and income elasticities. Energy Policy 41, 2–13.
Dallhammer, E., Neugebauer, W., Novak, S., Schuh, B., Essig, S., Plha, S., Dumke, H., Schaffer, H., Schneider, U., Öttl, F., 2010. Energieeffiziente Entwicklung von Siedlungen – planerische Steuerungsinstrumente und praxisorientierte Bewertungstools (Endbericht). Österreichisches Institut für Raumplanung, mecca consulting – Unternehmensberatung, technisches Büro für Raum- und Landschaftsplanung, pos-architekten ZT KEG, Wien.
De Jonghe, C., Delarue, E., Belmans, R., William, D., 2009. Interactions between measures for the support of electricity from renewable energy sources and CO2 mitigation. Energy Policy 37, 4743–4752.
EC, 2007a. Communication from the Commission to the European Council and the European Parliament. An energy policy for Europe (COM(2007) 1 final). European Commission, Brussels.
EC, 2007b. Communication from the European Commission to the Council and the European Parliament. Results of the review of the Community Strategy to reduce CO_2 emissions from passenger cars and light-commercial vehicles (COM(2007) 19 final). European Commission, Brussels.
EC, 2010. Report from the Commission to the European Parliamemt, the Council and the European Economic and Social Committee. Progress report on implementation of the Community's integrated approach to reduce CO2 emissions from light-duty vehicles (COM(2010) 656 final). European Commission, Brussels.
EC, 2011a. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Commitee of the Regions. A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050 (COM(2011) 112 final). European Commission, Brussels.
EC, 2011b. Commission Staff Working Paper. Impact Assessment. (Accompanying document to the WHITE PAPER Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system. SEC(2011) 358/2 final). European Commission, Brussels.
EC, 2011c. Commission Staff Working Document (Accompanying the White Paper - Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system No. SEC(2011) 391 final). European Commission, Brussels.
EC, 2012. EU Energy in Figures - Statistical Pocketbook 2012 [WWW Document]. URL http://setis.ec.europa.eu/newsroom-items-folder/eu-energy-figures-statistical-pocketbook-2012-now-available (accessed 9.8.13).
EC, Directorate-General for Energy and Transport, 2010. EU energy and transport in figures. Publications Office of the European Union, Luxembourg.
E-Control, 2010. Betriebsstatistik und Herkunftsnachweisdatenbank 2009 der Energie-Control Austria. [WWW Document]. URL http://www.e-control.at (accessed 12.21.10).
E-Control, 2011. Ökostrombericht 2011. Bericht der Energie-Control Austria gemäß § 25 Abs. 1 Ökostromgesetz. E-Control Austria, Wien.
E-Control, 2013. Wasserkraft [WWW Document]. URL http://www.e-control.at/de/konsumenten/oeko-energie/basiswissen/oekostrom-arten/wasserkraft (accessed 7.14.14).
EEA, OPOCE, 2006. How much bioenergy can Europe produce without harming the environment? (EEA Report No 7/2006). European Environment Agency, Office for Official Publications of the European Communities.
EK, 2013. Stellungnahme des Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschusses zu dem Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Richtlinie 98/70/EG über die Qualität von Otto- und Dieselkraftstoffen und zur Änderung der Richtlinie 2009/28/EG zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen, in COM (2012) 595 final - 2012/0288 (COD).
Ellerman, A.D., Buchner, B., Carraro, C. (Eds.), 2007. Allocation in the European Emissions Trading Scheme: rights, rents and fairness. Cambridge University Press, Cambridge.
Energieinstitut der Wirtschaft (Ed.), 2012. Eine kurze Vergleichsanalyse in: Energieinstitut der Wirtschaft, ERGO 01/2012, Österreich: Energieautarkie 2050? Wien.
Erdmann, G., Zweifel, P., 2008. Energieökonomik: Theorie und Anwendungen. Springer Deutschland.
Ericsson, K., Nilsson, L.J., 2006. Assessment of the potential biomass supply in Europe using a resource-focused approach. Biomass and Bioenergy 30, 1–15. doi:10.1016/j.biombioe.2005.09.001
EU, 2000. Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik, L 327.
EU, 2003. Richtlinie 2003/30/EG des Europäischen Parlamemts und des Rates vom 8. Mai 2003 zur Förderung der Verwendung von Biokraftstoffen oder anderen erneuerbaren Kraftstoffen im Verkehrssektor, L 123/42.
EU, 2006. Richtlinie 2006/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. April 2006 über Endenergieeffizienz und Energiedienstleistungen und zur Aufhebung der Richtlinie 93/76/EWG des Rates, L 114.
EU, 2009. Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerba-

ren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG, L 140/16.

EU, 2009. Richtlinie 2009/29/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Änderung der Richtlinie 2003/87/EG zwecks Verbesserung und Ausweitung des Gemeinschaftssystems für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten, L 140/63.

EU, 2012. Richtlinie 2012/27/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Oktober 2012 zur Energieeffizienz, zur Änderung der Richtlinien 2009/125/EG und 2010/30/EU und zur Aufhebung der Richtlinien 2004/8/EG und 2006/32/E/EG, L 315/1.

EU, 2013. EU Energy in Figures, Statistical Pocketbook. Publications Office of the European Union, Luxembourg.

European Commission DG TREN (Ed.), 2012. Transport in Figures 2011. Brussels.

Felberbauer, K., Muster, M., Schloffer, M., Theißnig, M., Tragner, M., Wanek, M., Zisler, M., 2010. NEUE ENERGIEN 2020. Kraftwerke im Klimawandel – Auswirkungen auf die Erzeugung von Elektrizität (KRAKE) (Endbericht). Ein Projektbericht im Rahmen der Programmlinie Neue Energien 2020 1. Ausschreibung Programmsteuerung: Klima- und Energiefonds Programmabwicklung: Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG), Kapfenberg.

Friedl, B., Steininger, K.W., 2002. Environmentally sustainable transport: definition and long-term economic impacts for Austria. Empirica 29, 163–180. doi:10.1023/A:1015600911243

GEA, 2012. Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.

Gebetsroither, B., Getzner, M., Steininger, K.W., 2007. Quantitative Evaluierung klimarelevanter verkehrspolitischer Maßnahmen in Österreich. WIFO-Monatsberichte 4, 389–399.

Haas, R., Nakicenovic, N., Ajanovic, A., Faber, T., Kranzl, L., Müller, A., Resch, G., 2008. Towards sustainability of energy systems: A primer on how to apply the concept of energy services to identify necessary trends and policies. Energy Policy 36, 4012–4021. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2008.06.028

Haas, R., Redl, C., Müller, A., Erdmann, G., Ehlers, N., Barthel, C., 2009. Langfristige Szenarien der gesellschaftlich optimalen Stromversorgung der Zukunft (Projektnummer 812784). Technische Universität Wien, Institut für elektrische Anlagen und Energiewirtschaft, Energy Economics Group, Wien.

Haas, R., Resch, G., Panzer, C., Busch, S., Ragwitz, M., Held, A., 2011a. Efficiency and effectiveness of promotion systems for electricity generation from renewable energy sources–Lessons from EU countries. Energy 36, 2186–2193. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2010.06.028

Haas, R., Hummel, M., Müller, A., Redl, C., Sagbauer, N., Suna, D., Barthel, C., Thomas, S., Bogner, T., 2011b. Strategie zur Mobilisierung des Stromsparpotenzials in Österreich (Endbericht FFG Projektnummer 817646), Energie der Zukunft. Wien.

Haas, R., Lettner, G., Auer, H., Duic, N., 2013. The looming revolution: How photovoltaics will change electricity markets in Europe fundamentally. Energy 57, 38–43. doi:10.1016/j.energy.2013.04.034

Habersack, H., Wagner, B., Hauer, C., Jäger, E., Krapesch, G., Strahlhofer, L., Volleritsch, M., Holzapfel, P., Schmutz, S., Schinegger, R., Pletterbauer, F., Formayer, H., Gerersdorfer, T., Pospichal, B., Prettenthaler, F., Steiner, D., Köberl, J., Rogler, N., 2011. DSS_KLIM:EN, Entwicklung eines Decision Support Systems zur Beurteilung der Wechselwirkungen zwischen Klimawandel, Energie aus Wasserkraft und Ökologie. (Endbericht, Studie im Auftrag der Kommunalkredit Austria AG, gefördert vom Klima- und Energiefonds), Wien.

Habersack, H., Wagner, B., Hauer, C., Jäger, E., 2012. Wasserkraft in Österreich – aktueller Bestand und Decision Support System (DSS WASSERKRAFT). OEWAW 64, 336–343. doi:10.1007/s00506-012-0405-z

Hausberger, S., Schwingshackl, M., 2011. Update der Emissionsprognose Verkehr Österreich bis 2030 (Studie erstellt im Auftrag des Klima- und Energiefonds No. Inst-03/11/ Haus Em 09/10-679). Technische Universität, Graz.

Hausberger, S., Kies, A., Rexeis, M., 2011a. Testverfahren für CO_2-Emissionen schwerer Nutzfahrzeuge (Test procedure for CO_2 emissions from heavy duty vehicles). Presented at the VDA – 12. Technischer Kongress, Ludwigsburg.

Hausberger, S., Rexeis, M., Blassnegger, J., Silberholz, G., 2011b. Evaluation of fuel efficiency improvements in the Heavy-Duty Vehicle (HDV) sector from improved trailer and tire designs by application of a new test procedure. Carried out under contract of The International Council on Clean Transportation and Verband der Automobilindustrie (Report No. I - 24 /2011 Hb - Em 18/11/679). Institute for International Combustion Engines and Thermodynamics, Technische Universität, Graz.

Hepburn, C., 2006. Regulation by Prices, Quantities, or Both: A Review of Instrument Choice. Oxf Rev Econ Policy 22, 226–247. doi:10.1093/oxrep/grj014

Herry M., Sammer G.,1998. Mobilitätserhebung österreichischer Haushalte, Arbeitspaket A3-H2 im Rahmen des Österreichischen Bundesverkehrswegeplan im Auftrag des BMWV

Herry, M., Schuster, M., Thaler, R., 2000. Betriebliches Mobilitätsmanagement - Erfolgreiche Wege für Umwelt und Wirtschaft. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.

Herry, M., Sedlacek, N., Steinacher, I., 2007. Verkehr in Zahlen Österreich Ausgabe 2011. Herry Consult GmbH, im Auftrag vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien.

Hesse, M., Trostorff, B., 2000. Raumstrukturen, Siedlungsentwicklung und Verkehr – Interaktionen und Integrationsmöglichkeiten; draft (Diskussionspapier No. 2). Institut für Regionalentwicklung und Strukturplanung, Erkner. http://www.irs-net.de/publikationen/working-papers/

Hoefnagels, R., Junginger, M., Panzer, C., Resch, G., Held, A., 2011. D10 Report: Long Term Potentials and Costs of RES. Part I: Potentials, Diffusion and Technological learning (A report compiled within the European research project RE-Shaping, work package 5). Copernicus Institute, Utrecht University; EEG, TU Wien; Fraunhofer ISI.

Howarth, R.B., Schipper, L., 1991. Manufacturing Energy Use in Eight OECD Countries: Trends through 1988. The Energy Journal 12, 15–40.

Hupkes, G., 1982. The law of constant travel time and trip-rates. Futures 14, 38–46. doi:10.1016/0016-3287(82)90070-2

IEA, OECD, 2009. World energy outlook 2009. International Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris.

Indinger, A., Leutgöb, K., Lutter, E., Mader, S., Nemestothy, K., Peherstorfer, N., Proidl, H., Sattler, M., Tretter, H., Veigl, A., 2006. Vorstudie für einen nationalen Biomasseaktionsplan für

Österreich (Endbericht). Austrian Energy Agency, im Auftrag des Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien

JAMA, 2008. Reducing CO_2 emissions in the global road transport sector. Japan automobile manufacturers association. Inc, Tokyo.

Jauschnegg, H., Pfemeter, C., 2011. Wärme, Strom, Treibstoffe. Bioenergie 2020. Österreichischer Biomasse-Verband, Wien.

Junginger, H.M., van Dam, J.M.C., Alakangas, E., Virkkunen, M., Vesterinen, P., Veijonen, K., 2010. Solutions to overcome barriers in bioenergy markets in Europe – D2.2, Resources, use and market analysis (EUBIONET III No. IEE/07/777/SI2.499477).

Jungwirth, M., Haidvogl, G., Moog, O., Muhar, S., Schmutz, S., 2003. Angewandte Fischökologie an Fließgewässern. Facultas Universitätsverlag, Wien.

Kalinowska, D., Steininger, K.W., 2009. Distributional impacts of car road pricing: Settlement structures determine divergence across countries. Ecological Economics 68, 2890–2896. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.07.004

Kalt, G., Kranzl, L., Adensam, H., Zawichowski, M., Stürmer, B., Schmid, E., 2010a. Strategien für eine nachhaltige Aktivierung landwirtschaftlicher Bioenergie-Potenziale (ALPot) (ENERGIE DER ZUKUNFT Endbericht). Austrian Energy Agency, Reinberg und Partner OEG - im-plan-tat, Instiut für nachhaltige Wirtschaftsentwicklung, Universität für Bodenkultur, Wien.

Kalt, G., Kranzl, L., Haas, R., 2010b. Long-term strategies for an efficient use of domestic biomass resources in Austria. Biomass and Bioenergy 34, 449–466. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.12.009

Kaltschmitt, M., Streicher, W., 2009. Regenerative Energien in Österreich: Grundlagen, Systemtechnik, Umweltaspekte, Kostenanalysen, Potenziale, Nutzung. Vieweg+Teubner.

Kettner, C., Kletzan-Slamanig, D., Schleicher, S., 2009. Instrumente für die Umsetzung von Maßnahmen zur Erreichung der Ziele für erneuerbare Energien. Studie im Auftrag des Verbandes der Elektrizitätsunternehmen BMLFUW. oesterreichs energie akademie, Wien.

Kettner, C., Kletzan-Slamanig, D., Köppl, A., Schinko, T., Türk, A., 2011. ETCLIP – The Challenge of the European Carbon Market: Emission Trading, Carbon Leakage and Instruments to Stabilise the CO_2 Price Price Volatility in Carbon Markets: Why it Matters and How it Can be Managed. WIFO Working Papers 409/2011.

Kettner, C., 2012. Der EU-Emissionshandel – Allokationsmuster und Handelsflüsse. WIFO-Monatsberichte 2012, 737–750.

Kletzan-Slamanig, D., Steininger, K.W., 2010. Gesamtwirtschaftliche Effekte der klimarelevanten Maßnahmen im Rahmen der Umweltförderung im Inland 2009, Monographien. Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung, Karl Franzens Universität Graz im Auftrag der Kommunalkredit Public Consulting, Wien.

klima:aktiv mobil, n.d. Mobilität [WWW Document]. URL http://www.klimaaktiv.at/mobilitaet.html (accessed 7.14.14).

Kobayashi, S., Plotkin, S., Ribeiro, S.K., 2009. Energy efficiency technologies for road vehicles. Energy Efficiency 2, 125–137.

Kolshus, H., Torvanger, A., 2005. Analysis of EU Member States' National Allocation Plans (CICERO Working Paper 2005:2). Center for International Climate and Environmental Research (CICERO), Oslo.

Köppl, A., Steininger, K.W. (Eds.), 2004. Reform umweltkontraproduktiver Förderungen in Österreich: Energie und Verkehr, Schriftenreihe des Institutes für Technologie- und Regionalpolitik der Johanneum Research. Leykam, Graz.

Köppl, A., Kettner, C., Kletzan-Slamanig, D., Schnitzer, H., Titz, M., Damm, A., Steininger, K., Wolkinger, B., Artner, H., Karner, A., 2011. Energy Transition 2012\2020\2050: Strategies for the Transition to Low Energy and Low Emission Structures. Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung, Wien.

Kranzl, L., Haas, R., Kalt, G., Diesenreiter, F., Eltrop, L., König, A., 2008. Strategien zur optimalen Erschließung der Biomassepotenziale in Österreich bis zum Jahr 2050 mit dem Ziel einer maximalen Reduktion an Treibhausgasemissionen (Endbericht Projektnummer 811260). Energy Economics Group, TU Wien, Wien.

Kranzl, L., Haas, R., Kalt, G., Müller, A., Nakicenovic, N., Redl, C., Formayer, H., Haas, P., Lexer, M.-J., Seidl, R., Schörghuber, S., Nachtnebel, H.-P., Stanzel, P., 2010. KlimAdapt. Ableitung von prioritären Maßnahmen zur Adaption des Energiesystems an den Klimawandel (ENERGIE DER ZUKUNFT Endbericht). Energy Economics Group, TU Wien; Inst. für Meteorologie, Inst. für Waldbau, IWHW, Univ. für Bodenkultur, Wien.

Kranzl, L., Müller, A., Hummel, M., Haas, R., 2011. Energieszenarien bis 2030: Wärmebedarf der Kleinverbraucher (Endbericht Ausarbeitung im Auftrag der Umweltbundesamt GmbH, Wien). Energy Economics Group, TU Wien, Wien.

Kranzl, L., Kalt, G., Müller, A., Hummel, M., Egger, C., Öhlinger, C., Dell, G., 2013a. Renewable energy in the heating sector in Austria with particular reference to the region of Upper Austria. Energy Policy 59, 17–31. doi:10.1016/j.enpol.2012.08.067

Kranzl, L., Matzenberger, J., Totschnig, G., Toleikyte, A., Schicker, I., Formayer, H., Gorgas, T., Stanzel, P., Nachtnebel, H.P., Bednar, T., Gladt, M., Neusser, M., 2013b. Modelling climate change impact on energy systems. Working Paper for the Second Review-Workshop in the project PRESENCE.

Krutzler, T., Böhmer, S., Gössl, M., Schindler, I., Storch, A., Wiesenberger, H., 2009. Energiewirtschaftliche Inputdaten und Szenarien als Grundlage zur Erfüllung der Berichtspflichten des Monitoring Mechanisms. Synthesebericht. Umweltbundesamt, Wien.

Kulmer, V., Koland, O., Steininger, K.W., Fürst, B., Käfer, A., 2014. The interaction of spatial planning and transport policy: A regional perspective on sprawl. Journal of Transport and Land Use 7, 57–77. doi:10.5198/jtlu.v7i1.374

LandLuft, 2012. Baukuturgemeinde-Preis 2012, Baukultur machen Menschen wie du und ich!, Waldviertel.

Léonardi, J., Baumgartner, M., 2004. CO_2 efficiency in road freight transportation: Status quo, measures and potential. Transportation Research Part D: Transport and Environment 9, 451–464. doi:10.1016/j.trd.2004.08.004

Mayer, J.R., 1845. Die organische Bewegung in ihrem Zusammenhang mit dem Stoffwechsel. The Organic Movement in Connection with the Metabolism.

McKibbin, W.J., Wilcoxen, P.J., 2002. The Role of Economics in Climate Change Policy. Journal of Economic Perspectives 16, 107–129. doi:10.1257/0895330027283

Metz, D., 2008. The Myth of Travel Time Saving. Transport Reviews 28, 321–336. doi:10.1080/01441640701642348

Millard-Ball, A., Schipper, L., 2010. Are we reaching peak travel? Trends in passenger transport in eight industrialized countries. Transport Reviews 31, 357–378. doi:10.1080/01441647.2010.518291

Molitor, R., Steininger, K.W., 2005. Vision, Analysis, and Future Pathways in Transport Research, in: Böhringer, C., Lange, A. (Eds.), Applied Research in Environmental Economics, ZEW Economic Studies. Physica-Verlag, Heidelberg, pp. 115–132.

Molitor, R., Burian, E., Heim, A., Kaefer, A., Keller, M., Aebi, C., Pischinger, R., Hausberger, S., Thaler, R., 1997. Umweltbilanz Verkehr. Oesterreich 1950-1996. Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie, Wien

Murray, B.C., Newell, R.G., Pizer, W.A., 2009. Balancing Cost and Emissions Certainty: An Allowance Reserve for Cap-and-Trade. Rev Environ Econ Policy 3, 84–103. doi:10.1093/reep/ren016

Müller, A., Redl, C., Haas, R., Türk, A., Liebmann, L., Steininger, K.W., Brezina, T., Mayerthaler, A., Schopf, J., Werner, A., Kreuzer, D., Steiner, A., Mollay, U., Neugebauer, W., 2012. Strategien für Energie-Technologie-Investitionen und langfristige Anforderung zur Emissionsreduktion (EISERN) (Projektendberich). klima + energiefonds, Wien.

Nakićenović, N., 1996. Energy Primer, in: Impacts, Adaptions and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 75–92.

Nakićenović, N., Haas, R., Hartner, M., 2012. Skriptum Energieökonomie. Technische Universität, Wien.

Nikolaou, A., Remrova, M., Jeliazkov, I., 2003. Biomass availability in Europe. Centre for Renewable Energy Sources, BTG Czech Republic s.r.o, ESD Bulgaria Ltd.

ODYSSEE-MURE, 2014. Energy Efficiency Trends & Policies [WWW Document]. URL http://www.odyssee-mure.eu/ (accessed 6.30.14).

OECD/ITF, 2012. Transport Outlook 2012: Seamless Transport für Greener Growth. Paris.

ÖROK, 2010. Kleinräumige Bevölkerungsprognose für Österreich 2010-2030 mit Ausblick bis 2050, Teil 1, Endbericht zur Bevölkerungsprognose. Wien.

ÖSG, 2012. Bundesgesetz über die Förderung der Elektrizitätserzeugung aus erneuerbaren Energieträgern (Ökostromgesetz 2012 – ÖSG 2012) StF: BGBl. I Nr. 75/2011 (NR: GP XXIV RV 1223 AB 1302 S. 113. BR: 8521 AB 8532 S. 799.).

Österreiche Bundesregierung, 2008. Regierungsprogramm 2008-2013, (Masterplan Wasserkraft umsetzen). Österreichische Bundesregierung, Wien.

Österreichs Energie, 2012. Zeit zum Handeln. Der Aktionsplan von Oesterreichs Energie. Oesterreichs Energie, Wien.

ÖSVO, 2012. 471. Verordnung des Bundesministers für Wirtschaft, Familie und Jugend, mit der Preise für die Abnahme elektrischer Energie aus Ökostromanlagen auf Grund von Verträgen festgesetzt werden, zu deren Abschluss die Ökostromabwicklungsstelle im Jahr 2012 verpflichtet ist (Ökostromverordnung 2012 - ÖSVO 2012).

Ott, W., Arend, M., Philippen, D., Gilgen, K., Beaujean, K., Schneider, S., 2008. Energieaspekte städtischer Quartiere und ländlicher Siedlungen (Schlussbericht. BFE-Projektnummer 101592). Im Auftrag des Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm Rationelle Energienutzung in Gebäuden, Bern.

Peperna, O., 1982. Die Einzugsbereiche von Haltestellen öffentlicher Nahverkehrsmittel im Straßenbahn-und Busverkehr (Masterarbeit). Fakultät für Bauingenieurwesen, TU Wien, Wien.

Pöyry Energie GmbH, 2008. Wasserkraftpotenzialstudie Österreich. Pöyry Energie GmbH, im Auftrag des Verbandes der Elektrizitätsunternehmen Österreichs (VEÖ), Wien.

Presiler, A., Thür, A., Neyer, D., Focke, H., 2012. SolarCooling Monitor, in: Berichte Aus Energie- Und Umweltforschung 28/2012. Wien.

Prettenthaler, F., Gobiet, A. (Eds.), 2008. Heizen und Kühlen im Klimawandel - Teil 1. Erste Ergebnisse zu den künftigen Änderungen des Energiebedarfs für die Gebäudetemperierung Studien zum Klimawandel in Österreich. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien.

Prettenthaler, F.E., Steininger, K.W., 1999. From ownership to service use lifestyle: the potential of car sharing. Ecological Economics 28, 443–453. doi:10.1016/S0921-8009(98)00109-8

Ragwitz, M., Held, A., Breitschopf, B., Rathmann, M., Klessmann, C., Resch, G., Panzer, C., Busch, S., Neuhoff, K., Junginger, M., 2011. Review report on support schemes for renewable electricity and heating in Europe (D8 Report) (Review report on support schemes for renewable electricity and heating in EuropeA; report compiled within the European research project RE-Shaping (work package 3) Contract No. EIE/08/517/SI2.529243). Fraunhofer ISI, ECOFYS, EEG/TU Wien, DIW/CPI Berlin, University of Utrecht, Bocconi University, KEMA; Lithuanian Energy Institute, ENERGO Banking.

Rathbauer, J., 2000. Biomassepotentialabschätzung für Österreich im Jahr 2010. Nachwachsende Rohstoffe 17, 9–11.

Rauh, W., Bleckmann, C., 2004. Mobilitätsmanagement - Nutzen für alle, VCÖ Schriftenreihe: Mobilität mit Zukunft. basierend auf VCÖ-Mobilitätsberater-Handbuch 1996, Wien.

Reichl, J., Kollmann, A., Tichler, R., Pakhomova, N., Moser, S., Görs, S., Lindhofer, J., Greibl, E., Fazeni, K., Haas, R., Müller, A., Sagbauer, N., Kloess, M., 2010. Analyse der Wirkungsmechanismen von Endenergieeffizienz-Maßnahmen und Entwicklung geeigneter Strategien für die Selektion ökonomisch-effizienter Maßnahmenpakete - AWEEMSS (Endbericht). Energieinstitut, Johannes Kepler Universität Linz, Energy Economics Group; finanziert aus den Mitteln des Klima- und Energiefonds.

Renner, S., Baumann, M., Jamek, A., Lang, B., Pfaffenbichler, P., 2010. Visionen 2050. Identifikation von existierenden und möglichen zukünftigen Treibern des Stromverbrauchs und von strukturellen Veränderungen bei der Stromnachfrage in Österreich bis 2050. Austrian Eneryg Agency, im Auftrag von Österreichs Energie (VEÖ), Wien.

Resch, G., Held, A., Faber, T., Panzer, C., Toro, F., Haas, R., 2008. Potentials and prospects for renewable energies at global scale. Energy Policy 36, 4048–4056. doi:10.1016/j.enpol.2008.06.029

Rettenmaier, N., Schorb, A., Köppen, S., Berndes, G., 2010. Status of biomass resource assessments. Version 3 (No. Deliverable No. D3.6). Biomass Energy Europe. IFEU, Heidelberg.

Schaefer, A., 2000. Regularities in Travel Demand: An International Perspective. Journal of Transportation and Statistics 3, 1–31.

Schipper, L., Haas, R., 1997. The political relevance of energy and CO_2 indicators-An introduction. Energy Policy 25, 639–649.

Schleicher, Stefan und Angela Köppl (2014). Energieperspektiven für Österreich bis 2050. Wien, Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung.

Spindler, K., 2013. Anpassungsmaßnahmen der Elektrizitätswirtschaft an den Klimawandel (Masterarbeit). Institut für Elektrizitätswirtschaft und Energieinnovation, Technische Universität Graz.

Stanzer, G., 2010, Regionales Rahmenkonzept für Windkraftanlagen im Nordburgenland und im Zentralraum um Eisenstadt – Aktualisierung der Fachgebiete Raumrdnung, Landschaft/ Weltkulturerbe (Endbericht), Studie im Auftrag des Amtes der burgenländischen Landesregierung, Wien.

stadtland Dipl.-Ing. Sibylla Zech GmbH, 2011, Transnational Strategy for Climate Proof Spatial Planning, European Territorial Cooperation 2007-2013 Alpine Space Programme, Project CLISP Climate Change Adaptation by Spatial Planning in the Alpine Space – WP 7, June 2011, Wien

Statistik Austria, 2011. Verkehrsmittel, Transportaufkommen und -leistung österreichischer Straßengüterverkehrsunternehmen nach Verkehrsbereichen im Jahr 2010. Statistik Austria, Wien.
Statistik Austria, 2013a. Energiebilanzen 1970-2011 [WWW Document]. URL http://www.statistik.gv.at/web_de/statistiken/energie_und_umwelt/energie/energiebilanzen/index.html (accessed 7.14.14).
Statistik Austria, 2013b. Nutzenergieanalyse für Österreich 1993-2011 [WWW Document]. URL http://www.statistik.gv.at/web_de/statistiken/energie_und_umwelt/energie/nutzenergieanalyse/index.html (accessed 7.14.14).
Steininger, K.W., 2008. Die Rolle der Raumordnung in der Klimaschutzdebatte, Raum Band 71, Heft September
Steininger, K.W., Novy, P., 1997. Die Fahrleistungswirkung von Car-Sharing Organisationen: Ein kontrolliertes Experiment. Internationales Verkehrswesen 49, 116–119.
Steininger, K.W., Vogl, C., Zettl, R., 1996. Car-sharing organizations: The size of the market segment and revealed change in mobility behavior. Transport Policy 3, 177–185.
Steininger, K.W., Prettenthaler, F.E., 2003. Umweltkontraproduktive direkte und indirekte Subventionen im Verkehrsbereich in Österreich, in: Greisberger, H. (Ed.), Zuckerbrot Und Peitsche. Umweltpolitische Steuerungsinstrumente von Ökoaudit Bis Ökosteuern. Überblick, Tatbestände, Kritische Reflexion, Politische Umsetzung, Wissenschaft & Umwelt Interdisziplinär. Forum Österreichischer Wissenschaftler für Umweltschutz, Wien, pp. 35–45.
Steininger, K.W., Gobiet, W., Binder, C., Friedl, B., Gebetsroither, B., Kriebernegg, G., Niederl, A., Omann, I., Seebauer, S., 2005. Technologien und Wirkungen von Pkw-Road Pricing im Vergleich (Wissenschaftlicher Bericht No. 1-2005). Wegener Zentrum für Klima und Globalen Wandel Karl-Franzens-Universität Graz, in Zusammenarbeit mit dem Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Technische Universität Graz, Graz.
Steininger, K.W., Friedl, B., Koland, O., 2006a. Driving Forces in Urban Sprawl and Policy Options: A Spatial Computable General Equilibrium Analysis (Report No. 13-2006), Spatial Dynamic Development and Environmental Sustainability. Wegener Center for Climate and Global Change, Universität Graz.
Steininger, K.W., Friedl, B., Schmid, C., 2006b. Circular Causality in Spatial Environmental Quality and Commuting (Report No. 13-2006), Spatial Dynamic Development and Environmental Sustainability. Wegener Center for Climate and Global Change, Universität Graz.
Steininger, K.W., Koland, O., Gebetsroither, B., Schmid, C., Zakarias, G., 2006c. New Primary Road Transport Infrastructure and the Development of Spatial Distribution of Growth: A Spatial CGE Analysis for Eastern Austrian Border Region (Report No. 13-2006), Spatial Dynamic Development and Environmental Sustainability. Wegener Center for Climate and Global Change, Universität Graz.
Steininger, K.W., Friedl, B., Gebetsroither, B., 2007a. Sustainability impacts of car road pricing: A computable general equilibrium analysis for Austria. Ecological Economics 63, 59–69. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.09.021
Steininger, K.W., S. Berdnik, B. Gebetsroither, M. Getzner, S. Hausberger und J. Hochwald (2007b). Klimaschutz, Infrastruktur und Verkehr, Studie im Auftrag der Bundesarbeiterkammer. Wissenschaftlicher Bericht Nr. 15-2007, Wegener Center Verlag Graz, ISBN-13 978-3-9502308-1-9, August 2007
Steininger, K.W., Schmid, C., Tobin, A., 2012. Regional and environmental impacts of expanding the heavy duty vehicle charge to the secondary road network in Austria. Empirica 39, 261–278. doi:10.1007/s10663-012-9184-9
Stern, N., 2007. The economics of climate change: the Stern review. Cambridge University press.
Sterner, T., 2007. Fuel taxes: An important instrument for climate policy. Energy Policy 35, 3194–3202. doi:10.1016/j.enpol.2006.10.025
Stocker, A., Großmann, A., Madlener, R., Wolter, M.I., 2011. Sustainable energy development in Austria until 2020: Insights from applying the integrated model "e3. at". Energy policy 39, 6082–6099.
Stöglehner G., Erkner S., Neugebauer G., 2013, Tools für Energieraumplanung. Ein Handbuch für deren Auswahl und Anwendung im Planungsprozess, BMLFUW (Eds.), Wien.
Streicher, W., Haas, R., Hausberger, S., Oblasser, S., Schnitzer, H., Steininger, K.W., Tatz. B.er, F., Titz, M., Heimrath, R., Kalt, G., Damm, A., Wetz, I., 2010. Energieautarkie für Österreich 2050 (Feasibility Study, Endbericht No. B068644, abgewickelt über den Klima- und Energiefonds.). im Auftrag des österreichischen Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (Lebensministerium), Wien.
Tiroler Landesregierung, 2011. Wasserkraft in Tirol – Kriterienkatalog. Kriterien für die weitere Nutzung der Wasserkraft in Tirol, Version 3.0. Tiroler Landesregierung, Innsbruck.
Toro, F., Jain, S., Reitze, F., Ajanovic, A., Haas, R., Furlan, S., Wilde, H., 2010. ALTER-MOTIVE. State of the art for alternative fuels and alternative automotive technologies (A report compiled within the European research project deriving effective least cost policy strategies for alternative automotive concepts and alternative fuels. Contract no: IEE/07/807/SI2.499569 WP3 Deliverable 8). Vienna University of Technology Energy Economics Group, ECN, ECU, IREES, WI, AEOLIKI, BSREC, RAEE, CRES, KISE, CUT, FGM-AMOR, CREETA-ECO, ECO-Council.
Türk, A., Steiner, D., Frieden, D., Prettenthaler, F., Resch, G., Müller, A., Liebmann, L., Steininger, K., Sommer, M., 2012. Die Rolle der Kooperationsmechanismen für die Erreichung des Österreichischen 2020-Ziels für erneuerbare Energie (Endergebnisse des vom Klima- und Energiefonds geförderten Projektes „ReFlex"). Johanneum Research, EEG, Wegener Center.
Umweltbundesamt, 2011a. Austria's national inventory, Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and under the Kyoto Protocol (REP-0308). Umweltbundesamt, Wien.
Umweltbundesamt, 2011b. GHG Projections and Assessment of public policies and measures in Austria (REP-331). Umweltbundesamt, Wien.
Umweltbundesamt, 2011c. Klimaschutz. Bericht 2011 (REP-0334). Umweltbundesamt, Wien.
Umweltbundesamt, 2013. Zehnter Umweltkontrollbericht. Umweltsituation in Österreich (REP-410). Umweltbundesamt, Wien.
Umweltmanagement Austria, 2011. Energieautarkie für Österreich? Kompaktfassung des Endberichts des Projekts. St. Pölten.
VCÖ (Ed.), 2012. Mehr Lebensqualität in Städten durch nachhaltige Mobilität, Schriftenreihe "Mobilität mit Zukunft". Verkehrsclub Österreich, Wien.
Vesterinen, P., Alakangas, E., 2001. Import and Export possibilities and fuel prices of biomass in 20 European countries (AFB-Net - Part 1). VTT Technical Research Centre of Finland, Jyväskylä.

VTPI, 2010. Transportation elasticities – how prices and other factors affect travel behavior. TDM Encyclopedia.

Voigt A., 2008. Stadt der kurzen Wege aus ökosozialer Sicht Nahversorgung und Naherholung in Wien vor dem Hintergrund der Alterung, Forschungsbericht, Ökosoziales Forum,, Wien.

Wagner, B., Hauer, C., Jäger, E., Pelikan, B., Habersack, H., in prep. A review of hydropower in Austria: Past, present and future development. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014.

WIFO, 2009. Energiestrukturen für 2020. Technisches Basisdokument für die österreichische Energiestrategie (2009/229/S/WIFO-Projektnummer: 5409).

Wörgetter, M., Rathbauer, J., Lasselsberger, L., Dissemond, H., Kopetz, H., Plank, J., Rakos, C., 2001. Bioenergy in Austria. Potential, Strategies, Success Stories. Production of Bioenergy – a Comparison of Framework Conditions. BLT Wieselburg, ÖVAF, Austrian Energy Agency, Wieselburg.

Zahavi, Y., Talvitie, A., 1980. Regularities in Travel Time and Money Expenditures. Transportation Research Record.

Zanni, A.M., Bristow, A.L., 2010. Emissions of CO_2 from road freight transport in London: Trends and policies for long run reductions. Energy Policy 38, 1774–1786. doi:10.1016/j.enpol.2009.11.053

Zumkeller, D., Kagerbauer, M., Streit, T., Voritsch, P., Chlond, B., Wirtz, M., 2011. Deutsches Mobilitätspanel (MOP), wissenschaftliche Begleitung und erste Auswertungen (Alltagsmobilität & Tankbuch , FE Projektnr.: 70.0864/2011). Institut für Verkehrswesen, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe

Band 3 Kapitel 4: Gesundheit, Tourismus
Volume 3 Chapter 4: Health, Tourism

Koordinierende Leitautoren
Hanns Moshammer, Franz Prettenthaler

LeitautorInnen
Andrea Damm, Hans-Peter Hutter, Alexandra Jiricka, Judith Köberl, Christoph Neger, Ulrike Pröbstl-Haider, Manfred Radlherr, Klaus Renoldner, Robert Steiger, Peter Wallner, Claudia Winkler

Für den Begutachtungsprozess
Urs Neu

Inhalt

ZUSAMMENFASSUNG

Das österreichische Gesundheitswesen ist ein bedeutender Teil der Volkswirtschaft. Dieser Wirtschaftszweig trägt auch Verantwortung für die nationalen Klimaschutz-Bemühungen. Viele Maßnahmen im Gesundheitswesen sind nicht spezifisch für diesen Sektor entwickelt worden, sondern sind Teil der sektoralen Strategien. Jedoch ist davon auszugehen, dass Maßnahmen, wie z. B. hohe thermische Gebäudestandards, effizientes Energiemanagement, Umstieg auf Erneuerbare Energieträger, ein nennenswertes Reduktionspotenzial besitzen. Daneben hat das Gesundheitswesen Auswirkungen etwa auf die Bereiche Mobilität und Abfallwirtschaft. Positive Beispiele betreffen Mobilitätsprogramme für Patienten und Mitarbeiter, umwelt- und ressourcenschonende Beschaffung und klimafreundliche Abfallkonzepte. Ein nachhaltiges Gesundheitswesen setzt zudem auf Prävention statt Behandlung und Heilung von Krankheiten. Dies würde eine strukturelle Änderung des gesamten Systems erfordern.

Der Klimawandel wirkt sich auf die Gesundheit über viele verschiedene Wege („Stressoren" wie Hitze, Überschwemmungen, Infektionskrankheiten, Vektoren, allergene Pflanzen) aus. In der Vorbereitung und Anpassung an diese Stressoren benötigt das Gesundheitswesen umfangreiche Monitoring-Daten, die sich auf sie beziehen. Das Gesundheitssystem liefert bereits jetzt routinemäßig Daten zur räumlichen und zeitlichen Verteilung von Geburten, Sterbefällen, Krankheiten, Krankenhausaufnahmen, meldepflichtigen Infektionskrankheiten und vielen mehr. Damit aussagekräftige und detaillierte Analysen der regionalen und lokalen Dosis-Wirkungs-Beziehungen möglich sind, müssten diese Daten aufbereitet und für die Klimaforschung zugänglich gemacht werden.

Auf diesen Untersuchungen aufbauend können Folgenabschätzungen durchgeführt werden, um Ressourcen- und Personalmanagement, Informationskampagnen und Ausbildung von ExpertInnen auf eine solide Basis zu stellen.

Anpassungs- und Klimaschutzmaßnahmen in anderen Bereichen können auch gravierende Folgen für die öffentliche Gesundheit bzw. für die Gesundheit und das Wohlergehen Einzelner haben. GesundheitsexpertInnen sollten daher auch ein Mitspracherecht bei der Gestaltung und Planung dieser Maßnahmen außerhalb des Gesundheitssystems haben. Damit ließe sich gewährleisten, dass Maßnahmen so konzipiert werden, dass sie vorteilhaft für die Gesundheit sind oder zumindest die positiven Effekte überwiegen.

In einer globalisierten Welt wirken sich auch Entwicklungen in fernen Kontinenten rasch auf die Gesundheit in Österreich aus. Vektoren und Infektionserreger können durch Personen- und Warenverkehr jederzeit eingeschleppt werden, Seuchen breiten sich viel rascher auch grenzüberschreitend aus. Klimawandel und andere Stressoren können den Migrationsdruck im Ausland verstärken und die Betreuung der Migranten könnte das Gesundheitswesen in der Zukunft vor neue Herausforderungen stellen. All dies erfordert eine ständige Überwachung („Surveillance") und Anpassungsbereitschaft des Gesundheitssystems.

Auch in der österreichischen Tourismusbranche sind umfangreiche Anpassungsmaßnahmen notwendig, um ihre hohe Wettbewerbsfähigkeit (2013 wurde Österreich im „Travel & Tourism Competitiveness"-Index des WEF auf Rang 3 gelistet) und ihre Bedeutung für die heimische Wirtschaft aufrecht zu erhalten. Im Jahr 2012 entsprachen die direkten Wertschöpfungseffekte des Tourismussektors 5,2 % des nationalen BIP, während sich der Wertschöpfungsbeitrag unter Berücksichtigung der indirekten Effekte auf 7,4 % belief. Der Sektor beschäftigte im Jahr 2011, gemessen in Vollzeitäquivalenten, 254 500 selbstständige und unselbstständige Erwerbstätige, was einem Anteil von 7,2 % an den Erwerbstätigen der Gesamtwirtschaft entspricht (Statistik Austria, WKÖ, BMWFJ und ÖHT, 2013). Aufgrund der starken Abhängigkeit vieler touristischer Aktivitäten von den vorhandenen Umweltbedingungen, wird die Sensitivität des Sektors im Hinblick auf Klimaänderungen generell als hoch eingestuft. Besonders betrifft dies den Wintertourismus, welcher stark von der Verfügbarkeit von Schnee abhängig ist. Hier gibt es bereits verbreitete Bemühungen zur Anpassung, allerdings handelt es sich dabei bislang eher um individuelle Maßnahmen, um auf bereits bemerkbare Auswirkungen des Klimawandels zu reagieren – oft unter hohen Kosten. Koordinierte, vorausschauende Aktivitäten, um sich auf zukünftige Änderungen des Klimas vorzubereiten, gibt es hingegen bislang kaum. Handlungsbedarf besteht zudem auch, um den Beitrag des Tourismussektors zur globalen Erwärmung zu mindern. Auf globaler Ebene schätzte ein Bericht von UNWTO, UNEP und WMO (2008) den Beitrag des Tourismus an den CO_2-Emissionen auf 5 %, wobei der Großteil auf Transport und Beherbergung der Touristen zurückzuführen ist. Eine Studie von Friesenbichler (2003) zeigt für den alpinen Wintertourismus in Österreich ein ähnliches Ergebnis. Sowohl bei den Beherbergungsbetrieben als auch bei der Touristenmobilität besteht ein hohes Potenzial zur Emissionseinsparung.

SUMMARY

The Austrian healthcare sector is an influential part of the national economy with approx. 10 % of all employees and 6 %

of gross national product. Every relevant economic sector also shares the responsibility for national climate change mitigation endeavours. This is even more the case for the health care sector since population health also depends on a „healthy", i.e. sustainable environment. Many mitigation measures in the health care sector are not specific to this sector but are of a more general nature. Good examples would be energy savings in hospitals or mobility schemes for patients, employees and consumables.

A more sustainable healthcare sector would focus more strongly on disease prevention instead of treatment and cure of diseases. This would only be possible through very thorough structural reforms of the whole system.

Climate change affects health through many different pathways („stressors" like heat, floods, infectious disease vectors, allergenic plants). In preparing and adapting to these stressors the healthcare sector must have access to monitoring data regarding these stressors. The sector usually produces health data. These data must be prepared in a way to allow meaningful and detailed analyses of the regional and local dose-effect-functions. Only this would enable impact assessments relevant for planning of resources and personnel management, information campaigns and expert training. These issues are discussed in more detail for several climate change related stressors.

Adaptation and mitigation measures of any sector might also have severe consequences for public health. Health experts therefore should also have a say in the design and planning of these measures. It should be the goal that measures are designed in a way that is beneficial for health or at least that beneficial effects are not outnumbered by adverse effects.

Tourism represents an important economic sector in Austria. Considering only direct effects, Austria's tourism industry contributed 5.3 % to the national GDP in 2010; or 7.5 % when taking indirect effects into account as well (Statistik Austria, WKÖ, BMWFJ und ÖHT, 2013). Due to its close link to features of landscape and environment as well as climatic conditions the tourism sector is considered to be quite sensitive towards changes in the climate. At the same time, its greenhouse gas emissions significantly contribute to climate change. Worldwide, the annual contribution of tourism to global CO_2 emissions is estimated at 5 %, with the bulk of emissions arising from tourist transportation and lodging (UNWTO-UNEP-WMO, 2008). Friesenbichler (2003) found similar results for alpine winter tourism in Austria. Hence, if emissions from the tourism sector are to decrease remarkably, above all effective mitigation strategies for transportation and lodging are needed. The Austrian tourism sector – especially the snow-based winter tourism sector – is already adapting to climate change. However, currently observable adaptation predominantly consists of individual reactive measures towards already noticeable effects rather than linked anticipatory activities towards expectable changes in the climate. Currently widely used strategies are often costly and do have limitations.

KERNAUSSAGEN

- Verantwortung des Gesundheitssektors

Der Gesundheitssektor ist ein wirtschaftlich bedeutender Teil der österreichischen Volkswirtschaft. Im Gegensatz zu manchen industriellen Sektoren ist die Gefahr geringer, dass strenge Auflagen zur Emissionsminderung lediglich eine Verlagerung von Standorten ins (fernere) Ausland bewirken. (mittlere Übereinstimmung)

- Klimarelevante Ressourcen

Ein nicht unwesentlicher Anteil an Energie und Ressourcen steckt beim Gesundheitssektor allerdings in den Ge- und Verbrauchsprodukten deren Erzeugung sich oft nationaler Kontrolle entzieht. Direkte Maßnahmen der Energieeinsparung sind häufig nicht spezifisch für den Gesundheitssektor, sondern betreffen z. B. Gebäudestandards und das Mobilitätsverhalten von Mitarbeitern und Patienten. (hohe Übereinstimmung)

- Datenbedarf

Eine gezielte und geplante Anpassung an längerfristige Veränderungen setzt die Kenntnis von detaillierten Kenndaten voraus. Im Gesundheitsbereich sind dies u. a. spezifische Gesundheitsdaten, die in vielfältiger Form gesammelt werden. (hohe Übereinstimmung)

- Gesundheitsdaten

Beispiele für Gesundheitsdaten sind das Sterbe- und Krebsregister, Register meldepflichtiger Erkrankungen, Bevölkerungsdaten, Untersuchungsdaten im Rahmen des Mutter-Kind-Passes, Schulärztliche Untersuchungen, Untersuchungen anlässlich der Musterung und arbeitsmedizinische Untersuchungen, Daten von Versicherungen zum Medikamentenkonsum und zum Konsum anderer medizinischer Leistungen sowie Krankenhausentlassungsdaten. Diese stehen oft aufgrund technischer Probleme, Unvollständigkeit, mangelnder Kooperationsbereitschaft oder fehlender gesetzlicher Grundlagen nicht oder nicht in ausreichendem Detaillierungsgrad für wissenschaftliche Untersuchungen oder für Trendanalysen zur Verfügung. (hohe Übereinstimmung)

- Maßnahmenmix

Gesundheitsrelevante Anpassung betrifft vielfach individuelle Verhaltensänderungen entweder von einem Großteil der Bevölkerung oder von Angehörigen bestimmter Risikogruppen. Derartige Verhaltensänderungen können durch verschiedenste Maßnahmen angeregt werden, z. B. durch Informationskampagnen, finanzielle Anreize positiver und negativer Art oder gesetzliche Bestimmungen. Erfolgreich ist oft nicht die einzelne Maßnahme, sondern der konzertierte Einsatz verschiedener Mittel, wobei verschiedenste politische Ebenen, die Privatwirtschaft und die Zivilgesellschaft in Kooperation wahrscheinlich die besten Ergebnisse erzielen. (mittlere Übereinstimmung)

- Gefahr von Nebenwirkungen

Viele Maßnahmen, sowohl der Adaptation als auch der Minderung, die primär nicht auf eine bessere Gesundheit zielen oder vom Gesundheitssektor ausgehen, haben möglicherweise indirekt bedeutsame gesundheitsrelevante Nebenwirkungen. (mittlere Übereinstimmung)

- Tourismus trägt wesentlich zum Klimawandel bei

Global: Weltweit wird der jährliche Beitrag des Tourismus an den gesamten CO_2-Emissionen infolge von Transport (Herkunft-Zielort), Beherbergung und Aktivitäten (vor Ort) auf rund 5 % geschätzt. Mit 75 % entfällt ein Großteil der tourismusverursachten CO_2-Emissionen auf den Touristentransport, gefolgt von der Beherbergung mit 21 % (hohes Vertrauen)

Österreich: Für Österreich liegen derzeit noch kaum Untersuchungen zu den THG-Emissionen des gesamten Tourismussektors vor. Eine detailliertere Erfassung findet sich bislang nur im Bereich des schneebasierten Wintertourismus. Als größter Emittent wird dort die Beherbergung mit einem Anteil von 58 % identifiziert, gefolgt vom An-, Abreise- und Zubringerverkehr mit 38 %. Seilbahnen, Schlepplifte, Pistengeräte und Schneekanonen sind hingegen nur für 4 % der gesamten schneebasierten Wintertourismus-Emissionen verantwortlich (mittleres Vertrauen).

- Vermeidungsfokus auf Transport und Beherbergung

Der größte Teil der im Tourismusbereich verursachten Emissionen entfällt auf den Transport und die Beherbergung von Touristinnen und Touristen (hohes Vertrauen). Will man die Emissionen des Tourismussektors merklich reduzieren, müssen Minderungsmaßnahmen insbesondere in diesen Bereichen ansetzen.

- Anpassung derzeit überwiegend Symptombekämpfung

Anpassung findet – insbesondere im schneebasierten Wintertourismus – bereits statt, allerdings handelt es sich überwiegend um individuelle und reaktive Maßnahmen an bereits spürbare Auswirkungen, anstatt vernetzter und vorausschauender Aktivitäten auf zu erwartende Klimaänderungen. Derzeit verbreitete Strategien sind oft kostspielig und haben ihre Grenzen (hohes Vertrauen).

4.1 Gesundheit und Tourismus
4.1 Health and tourism

Das vorliegende Kapitel widmet sich den Bereichen Gesundheit sowie Tourismus. Primäres Ziel ist die Darstellung jedes dieser Segmente in Form eines Sachstandsberichts – auf das Zusammenspiel dieser großteils unabhängigen Bereiche sei daher nur einleitend kurz eingegangen: tatsächlich haben die beiden Themen einige Gemeinsamkeiten und weisen eine gewisse, wenn auch geringe, Überschneidung im Bereich des Kur- und Wellness-Tourismus auf. Gerade diese Schnittmenge zeichnet sich dadurch aus, dass dieser Wirtschaftsbereich stark vom Image einer intakten („gesunden“) Natur profitiert und sollte daher ein besonderes Interesse an nachhaltigen Prozessen und Einrichtungen haben, was auch eine besondere Verantwortung für den Klimaschutz inkludieren sollte.

Die Gemeinsamkeiten der beiden Wirtschaftsbereiche liegen einerseits darin begründet, dass beide dem Dienstleistungssektor angehören und sich direkt den Menschen und ihrer Gesundheit, Erholung, Wohlbefinden widmen. Beide sind bedeutende Sektoren der österreichischen Wirtschaft. Andererseits gilt für beide Bereiche, dass viele Minderungsmaßnahmen nicht für den jeweiligen Bereich spezifisch sind: in beiden Bereichen sind Gebäude zur Unterbringung und Versorgung von Menschen (Krankenhäuser einerseits, Hotels andererseits) eine bedeutsame Senke für Energie und materielle Ressourcen (Nächtigungszahlen sind in beiden Bereichen wesentliche Maßzahlen der Leistung), ebenso fließen in beiden Bereichen viel Energie und Ressourcen in Ernährung und Mobilität (von Patienten bzw. Kunden). Klimarelevante Maßnahmen werden daher für beide Bereiche vielfach in anderen Kapiteln (Gebäudetechnik, Raumplanung, Verkehrsplanung, Landwirtschaft) zu diskutieren sein.

Bedeutsamer als die Gemeinsamkeiten sind allerdings die Unterschiede, sodass im Folgenden die beiden Teilkapitel getrennt diskutiert werden.

4.2 Gesundheit
4.2 Health

Während die Folgen des Klimawandels auf die Gesundheit in Band 2 behandelt werden, geht es hier um Maßnahmen des Gesundheitssystems, wobei sowohl Maßnahmen der Minderung als auch der Adaptation besprochen werden.

4.2.1 Minderung – Der ökologische Fußabdruck des Gesundheitswesens und Wege, diesen zu verkleinern

Das österreichische Gesundheits- und Sozialwesen beschäftigt ca. 10 % aller Erwerbstätigen und produziert ca. 6 % der österreichischen Brutto-Wertschöpfung, wobei der Anteil des Sektors für die genannten Indikatoren in den letzten Jahren größer wurde (Tabelle 4.1). Nach dem „System of Health Accounts" (OECD) betragen die gesamten Gesundheitsausgaben Österreichs über 10 % des BIP mit steigender Tendenz (Statistik Austria, 2012). Zulieferindustrien, wie die pharmazeutische Industrie, sind in diesen Zahlen nicht erfasst. Diese wichtige Rolle im österreichischen Wirtschaftsgefüge bedingt auch eine hohe Verantwortung des Sektors für die nachhaltige Erbringung der Wirtschaftsleistungen. Weil ökologische Nachhaltigkeit für die langfristige Förderung und Erhaltung der Gesundheit bedeutsam ist (Friel et al., 2011), kommt dem Gesundheitssektor darüber hinaus eine wichtige Vorbildwirkung zu, die dessen Verantwortung im Klimaschutz weiter unterstreicht (WHO, 2012).

Gesundheitsleistungen im Sinne von Kur-, Wellness- und Erholungsangeboten sind zusätzlich, im Sinne von Gesundheitstourismus, ein wichtiges Qualitätssegment des österreichischen Tourismus. Sie sichern somit die Leistungsbilanz des Staates und unterstreichen die Qualität Österreichs als Urlaubsland. In diesem Sinne ist auch die Verknüpfung von Gesundheit und Tourismus in diesem Kapitel angebracht. Gerade der Tourismus-Sektor „lebt" von der Vermarktung der heimischen Natur und sollte daher – bereits aus ökonomischen Gründen – anschaulich sorgsam mit Landschaft und natürlichen Ressourcen umgehen. Diese Überlegung, die im zweiten Teil dieses Kapitels näher ausgeführt wird, trifft sicher auch auf den Gesundheitssektor und in besonderem Maße auf den Kur- und Gesundheitstourismus zu. In diesem Zusammenhang sei etwa auch auf die neu überarbeitete Richtlinie für die Luftqualität in Kurorten verwiesen (Kommission für Klima und Luftqualität, 2013).

Dem hohen Anspruch an den Gesundheitssektor bezüglich des nachhaltigen und klimaschonenden Betriebes stehen verschiedene organisatorische, strukturelle und konzeptionelle Schwierigkeiten gegenüber. Leistungsempfänger und Zahler sind unterschiedliche Personen bzw. Institutionen: die budgetäre Verantwortung ist aufgesplittert und teilweise recht unübersichtlich, und auch die Verantwortung für die Leistungsaufbringung und Leistungsanforderung ist stark aufge-

Tabelle 4.1 Arbeitnehmer, Erwerbstätige und Wertschöpfung im Gesundheitssektor verglichen mit Österreich insgesamt. Erstellt in STATcube, Statistik Austria, Regionale Gesamtrechnungen, am 22.12.2011

Table 4.1 Workers, staff, and value creation in the health-care sector compared with the Austrian total. Produced from STATcube, the public data base of Statistik Austria, 2011/12/22

Jahr	Gesundheits- und Sozialwesen	Insgesamt	Prozent
Arbeitnehmer nach Wirtschaftsbereichen			
2007	355800	3471300	10,25
2008	362800	3551000	10,22
2009	370800	3522 000	10,53
Erwerbstätige nach Wirtschaftsbereichen			
2007	398800	4151300	9,61
2008	408200	4240300	9,63
2009	417500	4200300	9,94
Bruttowertschöpfung zu Herstellungspreisen nach Wirtschaftsbereichen (in Mio. €)			
2007	14613	248118	5,89
2008	15370	256194	6,00
2009	15635	248284	6,30

teilt (Bundesministerium für Gesundheit, 2013). Im Selbstverständnis des Gesundheitssektors steht die Wiedererlangung der Gesundheit an erster Stelle und stellt alle anderen Ziele in den Schatten. So steht im akuten Notfall oft die Rettung von Leben im Vordergrund, entsprechende Maßnahmen sollen rasch und gezielt erfolgen. Überlegungen zu möglichen langfristigen Folgen treten damit in den Hintergrund. Doch diese paradigmatische Einstellung des Gesundheitssystems prägt auch viele langfristige Entscheidungen, in welchen eine umfassendere Analyse und weitsichtige Denkungsart angezeigt wäre. Allein schon die Finanzierung des Systems und die öffentliche Anerkennung orientieren sich an der Anzahl der individuellen Behandlungsleistungen und weniger an der gesamten Performance des Systems (Bundesministerium für Gesundheit, 2013). Diese könnte etwa auch in der optimalen Gesunderhaltung, also Krankheitsvorsorge und -vermeidung bemessen werden (Rieder, 2008). So wird z. B. paradoxerweise eine bekannte versicherte Leistung als Gesunden- oder Vorsorge-Untersuchung bezeichnet, obwohl ihr Ziel nicht die Verhinderung, sondern lediglich die Früherkennung von Krankheit ist. Obwohl der gesellschaftliche Wert dieser „sekundären" Prävention nicht geschmälert werden soll, muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass primäre Prävention[1] im österreichischen Gesundheitssystem kaum etabliert und daher auch nicht institutionalisiert ist und damit keine Pflichtleistung der Sozialversicherungen darstellt. Wenige Kampagnen zur Verhaltensprävention (durchgeführt oder gefördert vom Fonds Gesundes Österreich [FGÖ][2]) und nur auf ausgewählte Bereiche (z. B. Lebensmittelsicherheit und Konsumentenschutz) beschränkte Maßnahmen der Verhältnisprävention sind eher die Ausnahmen.

Es gibt kaum Untersuchungen zu ökonomischen Vor- oder Nachteilen eines mehr präventiv ausgerichteten Gesundheitswesens (Cohen et al., 2008). Trotzdem wird Prävention als wichtiger Ansatz eines modernen staatlichen Gesundheitssystems von vielen Seiten (z. B. Kendall, 2010; Morgan et al., 2007) propagiert. Noch weniger ist klar, welche Auswirkungen eine Neuausrichtung des Gesundheitssystems in Richtung mehr Prävention auf den „Carbon Footprint" des Systems hätte. In einer generellen Diskussion um die nachhaltigere Ausrichtung der Gesellschaft spielen jedoch Überlegungen zu einem präventiv ausgerichteten Gesundheitssystem eine große Rolle.

Spitäler und Verwaltungsgebäude sind in der Energiebilanz dem Sektor „Dienstleistungen" zugeordnet, im Klimaschutzgesetz dem Sektor „Gebäude" (Querverweise Band 3, Kapitel 5). Robuste Daten über den Energieverbrauch und die THG-Emissionen liegen ebenso wenig vor, wie Analysen über Minderungsoptionen und deren Kosten. Jedoch ist davon auszugehen, dass Maßnahmen, wie z. B. hohe thermische Gebäudestandards, effizientes Energiemanagement, Umstieg auf Erneuerbare Energieträger, ein nennenswertes Reduktionspotenzial besitzen.

Maßnahmen zum schonenden Einsatz von Energie und Ressourcen im Gesundheitssektor entsprechen denjenigen, die auch in anderen Dienstleistungsbereichen geplant oder umgesetzt werden. Im Gebäudebereich (z. B. Spitäler) kann Energie durch hohe thermische Qualität von Gebäuden eingespart werden, aber auch durch ein fortschrittliches Energiemanagementsystem. Ein hoher Energieverbrauch wird allein durch den Stand-by-Betrieb medizinischer Geräte und auch in der Administration der Gesundheitsinstitutionen (EDV) verursacht (Nipitsch, 2010). Obwohl manche Geräte bei medizinischen Notfällen rasch zur Verfügung stehen müssen, kann durch sorgfältige Planung sehr viel unnötiger Stand-by-Verlust vermieden werden, selbst wenn die „großen Energiefresser" auch im Krankenhaus anderswo zu finden sind (Nipitsch, 2010). Der Einsatz fossiler Energie kann auch im Bereich der Mobilität durch die Standortwahl sowie durch Mobilitätsmanagement reduziert werden. In diese Überlegungen können Personenverkehr (Personal und Kunden bzw. Patienten) (Wallner, 2001) und Lieferverkehr (Produktanlieferung und Entsorgung) einbezogen werden.

Gebrauchsgüter sind im medizinischen Bereich sehr oft – bedingt durch Anforderung an hohe Materialqualität und Keimfreiheit bzw. Sterilität – zum einmaligen Gebrauch vorgesehen. Hier kann im Zuge einer Life-Cycle-Analyse überprüft werden, ob die Sterilisierung und Wiederverwertung von Einmalmaterialien energetisch sinnvoll ist und ob durch die Aufbereitung der Güter die Materialqualität gewährleistet bleibt (Dettenkofer et al., 1999). Vielfach hat die Industrie kein Interesse daran, dass ihre Güter mehrfach verwendet werden (Stanfield, 1983). Sie ist daher kaum bereit, für „wieder aufbereitete Güter" eine Qualitätsgarantie abzugeben, zumal sie die Standards der Wiederaufbereitung vielfach nicht selbst kontrollieren kann (Schmidt, 2013). Teilweise sind gesetzliche Regelungen hinsichtlich der Verantwortung und Haftungsübernahme notwendig, um ressourcenschonendere Abläufe zu ermöglichen (Favero, 2001).

[1] Man unterscheidet „primäre Prävention", also die Vermeidung von Krankheit durch Reduktion von Risiken oder Stärkung der Gesundheit, von der „sekundären Prävention", der Früherkennung von Krankheit zur Vermeidung von irreversiblen Folgeschäden, und der „tertiären Prävention", der Rehabilitation als Vermeidung von Invalidisierung als Folge irreversibler Schäden.

[2] http://www.fgoe.org/

In der Abfallentsorgung stellt sich häufig die Frage, wie diese auch unter den Prinzipien des Infektionsschutzes (kontaminierte Krankenhausabfälle) eine stoffliche oder zumindest energetische Verwertung des Abfalls erlaubt, ohne dass persistente toxische Nebenprodukte entstehen und freigesetzt werden. Neben der Entsorgungstechnik und dem Handling (Abfalltrennung) ist hier auch das Produkt-Design wesentlich, welches in der Materialauswahl und -zusammensetzung eine sortenreine Trennung und eine gefahrlose Entsorgung (z. B. Verbrennung) ermöglichen kann.

Österreichische Krankenhäuser haben sich sehr früh für Detailanliegen des Umweltschutzes engagiert. So fand die erste europäische CleanMed-Konferenz 2003 in Wien statt (Moshammer, 2003; 2004) und mehrere österreichische Krankenhäuser sind im Netzwerk gesundheitsfördernder Krankenhäuser organisiert (Dietscher, 2005). Einige Krankenhäuser, wie das KH Tulln, haben nachhaltige Mobilitätskonzepte umgesetzt (Wallner, 2001) oder sind, wie die Wiener Spitäler, Vorreiter in der PVC-Vermeidung (Klausbruckner und Nentwich, 2004; Moshammer, 2001; Lischka et al., 2011). Ein weiteres Beispiel stellt die Umwelterklärung des LKH Hartberg 2010 nach EMAS-VO dar. Es zeigt die Notwendigkeit, die kollegiale Führung des Hauses sowie die einzelnen Abteilungen aktiv in die Umweltschutzbemühungen einzubeziehen sowie quantifizierbare Zielvorgaben zu setzen und deren Erfüllung zu überprüfen. Im Zuge von Sparmaßnahmen werden allerdings Umweltschutzprogramme und entsprechende Stellen gekürzt bzw. wegrationalisiert. Eine ausführliche Übersicht zu einem gesamthaften Ansatz sozio-ökologischen Denkens, die am Beispiel eines österreichischen Spitals entwickelt wurde, geben Weisz et al. (2011).

4.2.2 Adaptierung – Anpassung an ein sich änderndes Klima

Die Menschheit besiedelt große Teile der festen Erdoberfläche und musste sich daher in ihrer Evolution an verschiedenste Klimabedingungen, von den Tropen bis in die Polarregion, anpassen. Dies erfolgte einerseits durch langfristige genetische Optimierungen (Hauttyp, Körperbau, Fettverteilung), andererseits durch kurzfristige physiologische Änderungen, zum Beispiel in der Regulation des Blutkreislaufs (z. B. Hautdurchblutung zur Wärmeregulation) oder der Schweißsekretion. Neben dieser physiologischen Adaptation gibt es Anpassungsmaßnahmen im Verhalten, wie unter anderem Bekleidung, Behausung und tageszeitliche Aktivitätsmuster. Diese Maßnahmen sind nicht im eigentlichen Sinn Anpassungsmaßnahmen des Gesundheitssystems, obwohl sie ebenso wie viele Anpassungsmaßnahmen in anderen Sektoren (Landwirtschaft, Bauen, Verkehr, Energie) der Gesundheit dienen.

Im Gesundheitssektor können Maßnahmen getroffen werden, die nicht spezifisch für diesen Sektor sind. So treffen z. B. Anpassungsmaßnahmen im Hochbau (Heizung, Kühlung, Lüftung, Schutz vor Extremniederschlag etc.) auch auf Bauwerke des Gesundheitssektors (z. B. Krankenhäuser) zu. Dabei ist die höhere Vulnerabilität einzelner Gruppen von Betroffenen zu berücksichtigen: für manche Patienten und Pflegebedürftige gestaltet sich etwa die Evakuierung (z. B. im Zuge einer Überschwemmung) schwieriger, als für die Normalbevölkerung. Manche Krankheiten erhöhen die Vulnerabilität gegenüber Kälte- und Hitzestress. Daher erscheint es sinnvoll, GesundheitsexpertInnen auch bei Adaptationsmaßnahmen in anderen Sektoren einzubeziehen, damit sich deren Maßnahmen an den Bedürftigsten orientieren.

Darüber hinaus gibt es Anpassungsmaßnahmen bzw. Situationen, welche eine Anpassung erfordern, die für den Gesundheitssektor spezifisch sind und die im Folgenden systematisch dargestellt werden. Dabei ist zu bedenken, dass sich der Gesundheitssektor generell an „Veränderungen" anpassen sollte und nicht nur isoliert an die Veränderung des Klimas. Tatsächlich ist die Gesellschaft – und mit ihr der Gesundheitssektor – mit mehreren langfristigen und teilweise globalen Trends der Veränderung konfrontiert. Für die Gesundheit besonders relevant sind neben dem Klimawandel folgende Entwicklungen: die steigende Urbanisierung, die Überalterung der Gesellschaft, die Zunahme chronischer Erkrankungen auf entzündlicher und degenerativer Basis („Wohlstandserkrankungen"), die Globalisierung bzw. der rasche und globale Transport von Personen und Waren und damit eventuell auch von Krankheitserregern, eventuell auch die Tendenz zur Entsolidarisierung und Individualisierung sowie eine Beschleunigung vieler Wirtschaftsvorgänge und Kommunikationssysteme („jederzeit und an jedem Ort und just-in-time"). Es erscheint ratsam, dass sich der Gesundheitssektor nicht an jede Veränderung isoliert anpasst, sondern eine Gesamtstrategie entwickelt, die Veränderungen in möglichst vielen Bereichen mitberücksichtigt. Dabei sollten Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Maßnahmen und den globalen und lokalen Änderungen beachtet und – im Sinne einer „Win-Win-Strategie" – berücksichtigt werden.

Weiters werden in diesem Abschnitt Anpassungen in einer den Auswirkungen des Klimawandels inhärenten Systematik diskutiert.

Jedes Unterkapitel ist einer gesundheitlich relevanten Auswirkung gewidmet, welche auf einen bestimmten klimarelevanten Stressor zurückzuführen ist. Zuerst werden die primä-

ren Gesundheitsfolgen des Klimawandels angesprochen, also jene, die unmittelbar durch Klimaphänomene, insbesondere extreme Wetterereignisse, in Österreich zu erwarten sind. Es sind dies:

- Hitzestress (mit konsekutiver Übersterblichkeit und erhöhter Inanspruchnahme des Gesundheitssystems) bzw. auch gesundheitliche Folgen extremer Kälte sowie
- Folgen anderer Extremwetterereignisse (Niederschläge und Überschwemmungen, Sturm, Gewitter, Lawinen- und Murenabgänge).

Als nächstes werden sekundäre gesundheitliche Klimafolgen dargestellt, die indirekt durch Klimaparameter bewirkt werden. Die Änderung des Klimas kann zu Änderungen in verschiedenen Systemen (z. B. Ökosystem) führen. Änderungen in diesen Systemen können gesundheitliche Auswirkungen bewirken. Im Einzelnen sind dies:

- Wirkungen auf die Luftqualität mit daraus resultierenden Folgen für die Gesundheit,
- Änderungen in den Vektorenpopulationen mit Auswirkungen auf bestimmte Infektionserkrankungen,
- Änderungen in der Qualität von Lebensmitteln und Trinkwasser,
- Auswirkungen auf Pflanzen und Tiere mit allergenem und toxischem Potential sowie
- mögliche Änderungen in der UV-Belastung.

Zuletzt werden tertiäre Auswirkungen diskutiert. Diese entstehen aufgrund durch den Klimawandel bedingter Vorgänge in anderen Weltgegenden, die z. B. durch Migrationsbewegungen Folgen für das österreichische Gesundheitssystem nach sich ziehen können.

Auf eine detailliertere Erörterung, wie sich der Klimawandel bzw. die einzelnen Stressoren auf die Gesundheit auswirken, muss allerdings zumeist verzichten werden, da dies die Aufgabe des entsprechenden Unterkapitels im Band 2 ist. Die angeführten Auswirkungen und die Anpassung daran werden nach einer kurzen thematischen Einleitung nach einem einheitlichen Schema behandelt.

Um eine effektive Anpassung an den Klimawandel zu ermöglichen, ist eine Reihe von Schritten notwendig:

- Daten über das Auftreten und das Einwirken des jeweiligen Stressors sind zu erheben (Umweltmonitoring).
- Daten zum jeweiligen Gesundheitsendpunkt sind bereitzustellen (Gesundheitsmonitoring).
- Umwelt- und Gesundheitsmonitoring sind in epidemiologischen Studien zu verknüpfen, um Aussagen über aktuelle und örtliche Expositions-Wirkungsbeziehungen zu ermöglichen und um möglichst präzise kurzfristige Prognosen für die Planung des Gesundheitsmanagements zu ermöglichen.
- Für die meisten der relevanten Stressoren bedarf es einer zeitgerechten und zielgenauen Information der betroffenen Bevölkerung.
- Ebenso sind die Gesundheitsberufe entsprechend zu informieren und zu schulen.
- Abschließend sind Management- und Notfallpläne im Gesundheitssektor zu entwickeln.

Im Zuge der Vorarbeiten für die „Nationale Anpassungsstrategie an den Klimawandel“ wurden auch Handlungsempfehlungen für den Gesundheitssektor erarbeitet (Haas et al., 2010). Diese behandelten ähnliche Handlungsfelder wie dieses Kapitel.

4.2.3 Gesundheitsfolgen durch Temperaturextreme

Es ist weitgehend davon auszugehen, dass sich die ÖsterreicherInnen ausreichend rasch auch an ein um wenige Grad wärmeres Klima adaptieren können. Von Temperaturen, bei denen zumindest die physiologische Adaptation von Säugetieren versagt, ist Österreich noch relativ weit entfernt. Es kann allerdings Weltgegenden geben, wo insbesondere durch Kombination von Temperatur und Luftfeuchte die dauerhafte Bewohnbarkeit in nicht allzu ferner Zukunft infrage gestellt ist (Sherwood und Huber, 2010).

In einem relativ breiten Temperaturband kann sich jede Lebensgemeinschaft an die ihrem Habitat entsprechende Durchschnittstemperatur anpassen. Dies ist daran abzulesen, dass die optimale Temperatur, d. h. jene Tagestemperatur, bei der statistisch gesehen die wenigsten Todesfälle auftreten, von der örtlichen Durchschnittstemperatur abhängt.

Gesundheitsrelevanter als die Durchschnittstemperatur sind die Häufigkeit und die Intensität von Temperaturextremen. Die derzeitigen Klimamodelle sind robuster bei der Vorhersage von Veränderungen im Mittel, während die Vorhersagequalität hinsichtlich von Extremen unsicherer ist (Christensen et al., 2007). Extremereignisse traten bzw. treten auch unabhängig vom Klimawandel auf. Das Gesundheitssystem setzt sich daher mit derartigen Extremereignissen auseinander.

Aufzeichnung und kurzfristige Prognose von Witterungsdaten

Die Aufzeichnung von Wetterdaten und kurzfristige Wetterprognosen sind nicht Aufgabe des Gesundheitssystems. Es sollte allerdings sichergestellt werden, dass das Gesundheitssystem rechtzeitig Zugang zu diesen Daten in ausreichender Auflösung erhält und diese problemadäquat und zeitgerecht auswerten kann. Die französischen Behörden wurden nach der massiven Hitzewelle im August 2003 heftig kritisiert, da das Gesundheitssystem erst regierte, als eine katastrophale Situation vorlag. Viele ÄrztInnen waren „auf Urlaub" und wurden erst aufmerksam, als die Prosekturen und Leichenhallen (Bestattung) einen Engpass bei der Lagerung der Verstobenen meldeten[3]. Seither propagiert Frankreich ein „real-time"-Monitoring, das neben dem Gesundheitsmonitoring („syndromic surveillance") auch das Umweltmonitoring umfasst (Josseran et al., 2008). In Österreich sind sowohl Umwelt- als auch Gesundheitsdaten in ausreichender Qualität und mit hinreichendem Detaillierungsgrad in der Regel erst mit etlicher Verzögerung erhältlich. Die Gemeinde Wien hat zwar nach der Hitzewelle 2003 vorübergehend versucht, ein „nahezu real-time"-Monitoring-Programm von wöchentlichen Sterbefällen auf Basis der Berichte der TotenbeschauärztInnen zu etablieren, Erfahrungen mit diesem System wurden aber bislang nicht publiziert. Welche tatsächlichen Vorteile das „real-time"-Monitoring in Frankreich bringt und ob dies den Aufwand in Bezug auf Temperaturstress lohnt, ist noch unklar.

Bedeutsam ist auch die kleinräumige Erfassung von Hitzeinseln in urbanen Ballungsräumen (Laaidi et al., 2012). Satellitendaten österreichischer Städte könnten nicht nur für gezielte bauliche Maßnahmen zur Reduktion städtischer Hitzeinseln herangezogen werden, sondern im Falle einer Hitzewelle auch dazu dienen, an die engen örtlichen Verhältnisse angepasste Hilfsmaßnahmen zu setzen bzw. schon vorsorgend zu planen.

Daten zu Gesundheitsfolgen, die mit Temperaturextremen assoziiert sind

Zahlreiche epidemiologische Studien belegen den Einfluss der Temperatur auf das tägliche Sterberisiko, wobei fast alle Todesursachen berührt werden, und auf Krankenhausaufnahmen, wobei in Hitzeperioden vor allem ein Anstieg bei Aufnahmen wegen Atemwegserkrankungen beobachtet wird (siehe Band 2).

Weniger ausführlich untersucht, aber dennoch für das Gesundheitssystem bedeutsam, ist die Inanspruchnahme primärer Versorgungseinrichtungen („Hausarzt") sowie etwa die Frequenz von Rettungsfahrten an Hitzetagen. Daten zur täglichen Sterblichkeit werden von der Statistik Austria gesammelt und mit geringer zeitlicher Verzögerung (im Sommer sind die Fallzahlen des Vorjahres erhältlich), ausreichendem Detaillierungsgrad sowie zu vertretbaren Kosten für Auswertungen zur Verfügung gestellt.

Etwas schwieriger gestaltet sich die Bereitstellung anderer Gesundheitsdaten: Daten über Krankenhausaufnahmen liegen erst mit größerer Verzögerung (> 1 Jahr) vor. Erwägungen zum Datenschutz begründen eine restriktive Datenweitergabe und nicht zuletzt ist das sehr umfangreiche Datenmaterial vergleichsweise teuer in der Anschaffung. Die Qualität der Daten (z. B. Diagnoseschlüssel) kann nicht abschließend beurteilt werden.

Daten von Rettungsdiensten, die keiner Standardisierung unterliegen, können im Einzelfall bereitgestellt werden. So unterscheiden sich die Daten der einzelnen Notfall- und Rettungszentralen hinsichtlich ihrer Kodierung und bezüglich anderer Details, weshalb eine Vergleichbarkeit nicht gewährleistet ist. Andere zeitlich aufgelöste Daten (z. B. hausärztliche Inanspruchnahme, Medikamentenkonsum) sind wahrscheinlich nicht in ausreichender Qualität erhältlich. Eigene Versuche, diese Daten zu erhalten, sind jedenfalls bisher gescheitert. Von Interesse wären auch Krankenstandsdaten der Gebietskrankenkassen.

Epidemiologische Studien

Temperatur ist eine bedeutende Störvariable verschiedener Zeitreihenuntersuchungen, z. B. betreffend die Gesundheitseffekte von Luftschadstoffen. Epidemiologische Auswertungen, die sich mit der Temperatur als eigentlichem Gesundheitsprädiktor befassen, sind in Österreich noch nicht sehr oft erfolgt. Die Hitzeperiode 2003 mit ihren Auswirkungen auf Wien wurde in zwei in wissenschaftlichen Journalen veröffentlichen Arbeiten (Hutter et al., 2007; Muthers et al., 2010) beschrieben. Im Zuge von StartClim-Projekten[4] wurden verschiedene Aspekte von Hitze und Temperatur für Wien untersucht (Moshammer et al., 2006b, 2009; Gerersdorfer et al., 2006). Im Auftrag des Landes Oberösterreich erfolgte eine ähnliche Auswertung für den Großraum Linz und im Vergleich dazu für das Mühlviertel (Moshammer et al., 2009). Für die Planung von Warnschwellen und Maßnahmenpaketen wäre es notwendig, zumindest für alle urbanen Regionen Österreichs ähnliche Untersuchungen durchzuführen und diese auch in bestimm-

[3] Wikipedia Zugriff 6.3.2012: http://en.wikipedia.org/wiki/2003_European_heat_wave

[4] www.austroclim.at/startclim

ten Zeitabständen zu wiederholen. Damit könnte auch eine allfällige Änderung der Dosis-Wirkungs-Beziehung (z. B. aufgrund von Adaptierungsmaßnahmen) sichtbar werden.

Die Analyse von Daten aus dem Mühlviertel hat gezeigt, dass auch in eher ländlichen Regionen Gesundheitsindikatoren (z. B. tägliche Sterblichkeit) von der Temperatur signifikant beeinflusst werden (Moshammer et al., 2009). Weltweit gibt es allerdings kaum Untersuchungen zur Sterblichkeit bei Hitzewellen in ländlichen Gebieten. Wegen der geringeren Bevölkerungsdichte müssen größere geografische Einheiten gemeinsam betrachtet werden, um die nötige statistische Aussagekraft zu gewährleisten. Dies könnte jedoch zu einer nicht-differenziellen Fehlklassifizierung der Belastung führen. Generell dürften allerdings urbane Ballungsräume wegen des städtischen Hitzeinsel-Effekts besonders von zukünftigen Hitzeperioden betroffen sein. Daher sind in Österreich vor allem urbane Gebiete in Ost- und Nordost-Österreich, also die Städte Wien, Linz und Graz sowie ihr näheres Umfeld, von Interesse.

Hitzewarnungen

Um eine Hitzewarnung aussprechen zu können, bedarf es nicht nur zuverlässiger kurzfristiger Wetterprognosen, sondern es sollte auch bekannt sein, ab welcher Schwelle mit einem relevanten zusätzlichen Risiko zu rechnen ist (Michelozzi et al., 2010). Die öffentliche Kommunikation der Warnungen bedarf einer engen Zusammenarbeit mit den Medien.

Wenn Warnungen ausgesprochen werden, sollten sie auch von praktikablen und klaren Handlungsempfehlungen begleitet werden. Bei alldem ist das Zielpublikum zu bedenken: bei Hitzewellen sind ältere, allein stehende und kranke Personen sowie soziale Randgruppen besonders gefährdet (O'Neill et al., 2003; Khalaj et al., 2010; Reid et al., 2009; English et al., 2009; Stafoggia et al., 2006, 2008, 2009; Semenza, 1996; Kovats, 2006; Foroni et al., 2007; Hajat et al., 2010). Diese Personenkreise sind tendenziell schlecht über „neue Medien" wie das Internet erreichbar. Örtlich gezielte Überlegungen, wie besondere Gruppen erreicht werden können (z. B. über ObdachlosenbetreuerInnen), wären anzustellen.

Ein für Österreich vorbildlicher Plan für Hitzewellen ist der Steirische Hitzeschutzplan[5], der nicht nur Regeln für die Auslösung der Hitzewarnung enthält, sondern auch Adressen und Zuständigkeiten bis auf die Ebene der Verwaltung jedes einzelnen Pflegeheimes und Krankenhauses samt begleitenden Handlungsanweisungen und Informationsmaterial.

Information für ÄrztInnen und Pfleger über Hitze

Die Übersterblichkeit während einer Hitzewelle ist nur zu einem verschwindend kleinen Teil durch spezifische „Hitzetodesfälle" bedingt. Die meisten Todesfälle betreffen Personen mit einer Grundkrankheit (Atemwege, Herzkreislauf-System), die durch den Hitzestress zusätzlich geschwächt werden und an ihrer Grundkrankheit sterben. Dabei ist auch in den Krankenanstalten eine Übersterblichkeit während Hitzewellen zu beobachten. Eventuell ist auch das Pflegepersonal durch die Hitze geschwächt (und weniger sorgsam). Wahrscheinlich bedarf es weniger technisch aufwendiger Interventionen als einfacher pflegerischer Maßnahmen, wie etwa der Kontrolle, ob der Patient wohl auch ausreichend Flüssigkeit zu sich nimmt. ÄrztInnen und mobile Pflegedienste könnten auch einfache Verhaltensweisen zur Kühlung der Wohnung empfehlen. Eine spezifische „Hitzeausbildung" ist hingegen für den stationären Bereich weniger notwendig als administrative Maßnahmen (Qualitätskontrolle, Personalmanagement). Da die Anzahl der Todesfälle, nicht aber der Krankenhausaufnahmen, wegen Herz-Kreislauf-Problemen bei Hitzewellen zunehmen, ist davon auszugehen, dass von den HausärztInnen sowie den Pflegenden und den ÄrztInnen in Pflegeheimen die Gefahr unterschätzt wird (Moshammer et al., 2006b). Daher ist es notwendig, dass die Hitzeempfindlichkeit von Patienten besser eingeschätzt werden kann. Dies ist auch wichtig, um bei einer massiven Hitzewelle jene Personen identifizieren zu können, die in dieser Zeit besondere Hilfe (mobile Krankenpflege, Nachbarschaftshilfe) benötigen. Niedergelassene ÄrztInnen sollten jedenfalls auch gesunde bzw. „beinahe" gesunde Patienten im Falle einer Hitzewelle bezüglich des individuellen Verhaltens kompetent beraten können.

Managementaufgaben

Viele Einrichtungen des Gesundheitswesens haben im Sommer reduzierten Betrieb. Dies ist teilweise gerechtfertigt, da die fakultativen Patienten in dieser Zeit Urlaub im Ausland machen. Wenn Österreich – teilweise auch als Folge des Klimawandels – seine Tourismusangebote in Richtung „Sommerurlaub" ausbaut und wenn – in Folge des demographischen Wandels – immer mehr alte Personen allein daheim bleiben, während pflegende Angehörige gerade in den Sommermonaten – teilweise auch durch Schul- und Betriebsferien vorgegeben – Urlaub machen, dann sind die jahreszeitlichen Personal- und Urlaubsplanungen im Heil- und Pflegebereich anzupassen.

Bedeutender ist wahrscheinlich die mobile Altenbetreuung und Krankenpflege. Diese wird derzeit nach strengen Indika-

[5] http://www.verwaltung.steiermark.at/cms/beitrag/11487944/9752/

tionen gewährleistet und finanziell unterstützt bzw. gezahlt. „Hitzewelle" oder „Urlaub der Angehörigen" zählen in der Regel nicht zu diesem Indikationskatalog. Hier gilt es in Zukunft praktikable und sozial verträgliche Modelle zu finden.

Zur vorsorgenden städtebaulichen Planung zur Vermeidung von Aufheizungen im städtischen Raum liegt vielfältige Literatur vor. In diesem Zusammenhang ist innerstädtisches Grün (Altbäume, Parks, Wasserflächen) bedeutsam. Städte und Gemeinden können durch Planungsvorgaben (Bebauungspläne) Anpassungsmaßnahmen fördern bzw. begünstigen. Ein positives Beispiel ist die durch die Bebauungsplanung gewährleistete großflächige Dachbegrünung im Gewerbegebiet in der Stadt Linz. Eine Entsiegelung kann vor allem die gesundheitlich beeinträchtigende Hitze in den Nachtstunden mildern. Grünflächen heizen sich am Tage weniger auf und geben in der Nacht weniger (fühlbare) Wärme ab. Scharf et al. (2010) zeigten hier am Beispiel von Graz Möglichkeiten zur Entsiegelung von Straßenbahngleisen auf. Gesundheitliche Expertise sollte hinsichtlich dieser sowie anderer möglicher Maßnahmen bei Fragen der Stadtplanung zu Rate gezogen werden.

4.2.4 Katastrophale Witterungsereignisse

Was verstehen wir unter einem katastrophalen Witterungsereignis?

Für ein Flussufer, das jedes Jahr zur Schneeschmelze überflutet wird, stellt diese jährliche Überflutung keine Katastrophe dar. Das Ökosystem hat sich der wiederkehrenden Überflutung angepasst (etwa durch Ausbildung eines Auwaldes) und die menschliche Nutzung muss sich an die jährlichen Überflutungen anpassen (entweder, indem diese Fläche nicht bebaut wird, oder, indem für allfällige Bauwerke besondere Auflagen bestehen). Für ein anderes Areal, das seit Jahrzehnten nicht überflutet worden ist, kann eine einmalige Überflutung ähnlichen Ausmaßes hingegen ein katastrophales Ereignis darstellen. Insofern dabei Menschen und menschliche Nutzungen betroffen sind, ist dies auch für den Gesundheitssektor relevant (Hajat et al., 2003).

Die Anzahl akuter Fälle von Gesundheitsschäden durch Wetterkatastrophen ist in Österreich in der Regel gering (Moshammer, 2012). Allerdings kommen jedes Jahr einzelne Personen durch Sturm, Blitzschlag, Murenabgang, Erdrutsche, Lawinen und Überflutung ums Leben. Durch ingenieurtechnische Sicherungsbauten, wie z. B. Dämme, Blitzableiter oder Lawinenschutzbauten, kann das Risiko solcher Einzelereignisse gemindert werden. Diese fallen zwar nicht in die unmittelbare Kompetenz des Gesundheitssystems, das Gesundheitssystem muss allerdings die Kapazitäten bereitstellen, um Verletzte bei derartigen Katastrophen rasch und optimal versorgen zu können. Die Rettungskette, angefangen von Ersthelfern bis hin zur stationären Versorgung, ist derzeit in der Regel ausreichend. Es ist jedoch regelmäßig zu evaluieren, ob diese Versorgungskette weiterhin angesichts möglicherweise durch Klimawandel bedingter regionaler Häufungen bestimmter Extremereignisse, des demographischen Wandels, Sparmaßnahmen im Gesundheitsbereich und struktureller Probleme der Freiwilligenarbeit (Rotes Kreuz, Bergrettung, Feuerwehr) auch in Zukunft gewährleistet bleibt.

Neben der akuten Versorgung einzelner betroffener Personen stellen sich für das Gesundheitssystem allerdings zwei weitere Aufgaben mit insgesamt größerer Bedeutung (Moshammer, 2012):

- die längerfristige Betreuung und Versorgung von durch die Katastrophe physisch und psychisch traumatisierten Personen und
- die Sicherstellung der eigenen Infrastruktur trotz des Katastropheneintritts.

Letzteres umfasst nicht nur den Schutz von Krankenhäusern vor Hochwässern und dergleichen, sondern auch die Sicherstellung der häuslichen Versorgung im Fall, dass Transportwege unterbrochen worden sind.

Katastrophenmelde- und -überwachungssysteme

Katastrophen sind per Definition seltene Ereignisse. Die Dokumentation von herausragenden seltenen Ereignissen und deren unmittelbarer Folgen sind nicht sehr aufwendig. Diese Aufgabe fällt nicht in den Bereich des Gesundheitssektors.

Dokumentation von Gesundheitsfolgen

Akute Gesundheitsschäden (z. B. Verletzungen, Todesfälle) sind relativ leicht zuzuordnen und auch zu erfassen. Viel schwieriger ist die Erfassung langfristiger Folgen (Tapsell und Tunstall, 2008; Leonardi, 2010; Fabre et al., 2004). Dazu zählen beispielsweise psychische Traumata (z. B. aufgrund schwerer materieller Verluste) und Folgen von Schäden an der Infrastruktur (Verkehr, Wasserver- und -entsorgung). Zur Abschätzung der Folgen sind räumlich hoch aufgelöste Daten niederschwelliger Gesundheitsfolgen notwendig, wie die Inanspruchnahme hausärztlicher Betreuung, Medikamentenverbrauch etc. Diese Daten liegen in der Regel nicht vor.

Abschätzung der Schwere der Folgen

Aus Studien in anderen Ländern (Huang et al., 2010; Telles et al., 2009; Auger et al., 2000) ist bekannt, dass nach Katastrophen verstärkt Fälle mit posttraumatischem Stress-Syndrom auftreten und daher ein erhöhter Bedarf an psychologischer bzw. psychiatrischer Betreuung besteht. Mangels detaillierter, hoch aufgelöster Gesundheitsdaten gibt es aus Österreich keine verlässlichen Untersuchungen zu den mittel- und langfristigen Gesundheitsfolgen katastrophaler Ereignisse, welche für die Planung von Maßnahmen des Gesundheitssystems bei zukünftigen Katastrophen herangezogen werden könnten.

International sind einige Studien bekannt (Ahern et al., 2005; Siddique et al., 1991; Woodruff et al., 1990; Kunii et al., 2002; Sur et al., 2000; Katsumata et al., 1998; Biswas et al., 1999; Mondal et al., 2001; Cervenka, 1976; Aavitsland et al., 1996; Waring et al., 2002; Wade et al., 2004; Reacher et al., 2004), die sich zum Beispiel mit den Folgen von Überschwemmungen, aber auch von extremen Trockenperioden, auf die Trinkwasserqualität und auf die Gesundheit im Sinne von Durchfallerkrankungen befassen. Wiederum fehlen österreichische Studien für eine genauere Abschätzung des lokalen Risikos, das in Abhängigkeit von technischen und geografischen Details starken Schwankungen unterliegt.

Katastrophenwarnungen

Generell werden Katastrophenwarnungen von meteorologischen Diensten und dem Katastrophenschutz ausgelöst. Vom Gesundheitssektor sind praktische Ratschläge beizusteuern, z. B. betreffend die Verwendung bzw. Behandlung von Wasser, falls Trinkwasserleitungen beschädigt worden sind, oder die Benutzbarkeit und Sanierung von Wohnraum nach Durchfeuchtung und Schimmelbildung.

Training der ExpertInnen

Die diversen Hilfskräfte organisieren häufig gemeinsam Katastrophenübungen, bei denen teilweise die regionalen Gesundheitsdienste (ÄrztInnen, Krankenhäuser) mit eingebunden sind. Es erscheint sinnvoll, diese Einbindung der Gesundheitsdienste noch zu vertiefen.

Anforderungen an das Gesundheitssystem

Vorrangig ist der Schutz der eigenen Infrastruktur (Krankenhäuser etc.). Notfallpläne sollten besonders im Hinblick auf vulnerable Bevölkerungsgruppen erstellt werden. So ist an die Evakuierung bzw. Versorgung von Alten- und Pflegeheimen zu denken und in entsprechenden Katastrophenplänen vorzubereiten und es müssen hygienische Qualitätsanforderungen für Ausweich- und Notquartiere definiert werden. Dies gilt auch für privaten Wohnraum und zwar sowohl für Ausweichquartiere als auch für den Wiederbezug nach der Katastrophe (z. B. Wasserschäden nach Überflutung).

Schäden an der Infrastruktur, wie z. B. der Trinkwasserversorgung, bedingen ein unmittelbares Gesundheitsrisiko. Im Prinzip ist für jede Region bekannt, an welche Trinkwasserversorgungsnetze die einzelnen Haushalte angeschlossen sind bzw. wie viele Haushalte auf die Nutzung privater Quellen und Brunnen angewiesen sind. Diese Informationen müssten allerdings im Ereignisfall den zuständigen Gesundheitsbehörden übersichtlich und kleinräumig zur Verfügung stehen. Dies ist wahrscheinlich nicht in jeder Bezirksverwaltungsbehörde in gleichem Umfange gewährleistet.

4.2.5 Luftqualität

Luftqualität: ein unterschätzter Gesundheitsfaktor

Epidemiologische Studien aus allen Weltgegenden (Samoli et al., 2008) und mittels verschiedensten Studiendesigns haben eindrücklich und reproduzierbar die gesundheitlich nachteiligen Effekte von Luftschadstoffen gezeigt. Feinstaub und Ozon sind hierbei die bedeutendsten Indikatoren für die Luftqualität. In die medizinische Praxis haben diese Erkenntnisse allerdings kaum Eingang gefunden. Da in der täglichen Interaktion zwischen ÄrztInnen und PatientInnen die Luftqualität nicht beeinflusst werden kann, orientieren sich therapeutische Bemühungen an anderen Aspekten des jeweiligen Leidens der PatientInnen.

Die Luftqualität ist mit dem Wetter, aber auch dem Klima, auf vielfältige Weise verknüpft: einige Luftschadstoffe und Treibhausgase haben die gleichen Quellen (Verbrennungsvorgänge), einige Luftschadstoffe wirken als Treibhausgase (Ruß, Ozon), während anderen (Sulfate) eine kühlende Wirkung zugeschrieben wird, und die Witterung hat einen direkten Einfluss auf Schadstoffkonzentrationen (Christensen et al, 2007).

Während für Nordamerika auch Modelle zum Einfluss des Klimawandels auf die Feinstaubbelastung entwickelt wurden (Tagaris et al., 2009), wurde für Europa bisher (2012) erst der Einfluss auf Ozon untersucht (Orru et al., 2012) und für den Alpenraum ein mäßiger Ozonanstieg bis 2050 prognostiziert.

Daten zur Luftqualität

Daten zur Luftqualität werden nach europäisch vorgegebenen Kriterien von den Umweltschutzabteilungen erhoben und über das Umweltbundesamt (einschließlich der Daten der eigenen Hintergrund-Messstellen) sowie über die Europäische Umweltschutzagentur öffentlich zugänglich gemacht (EEA, 2013a).

Gesundheitsdaten

Ähnlich wie die Temperatur haben Luftschadstoffe nicht nur Effekte auf spezielle Krankheitsrisiken, auch viele Grunderkrankungen werden durch Luftschadstoffe verschlimmert. Insbesondere chronisch entzündliche Vorgänge, die letztlich auch zu den, zu den Wohlstandskrankheiten zählenden, Stoffwechselerkrankungen beitragen, werden durch die Schadstoffbelastung ausgelöst. Im Prinzip gilt das Gleiche, wie in Abschnitt 4.2.3 ausgeführt wurde: während Mortalitätsdaten relativ unkompliziert zu erhalten sind, besteht für andere Datensätze noch einiger Verbesserungsbedarf.

Luftqualität: Dosis-Wirkungs-Beziehung

In Österreich wurden bereits zahlreiche epidemiologische Untersuchungen zu Luftschadstoffen durchgeführt, deren Ergebnisse weitgehend mit internationalen Erkenntnissen übereinstimmen. Es sind dies vor allem Zeitreihen-Untersuchungen (Friza et al., 1986; Neuberger et al., 1987, 2004, 2005, 2007a, 2007b, 2008; Krüger et al., 2009), aber auch Längsschnitt-Untersuchungen (Neuberger et al., 1997, 2002) und Panel-Untersuchungen (Wittels et al., 1997; Moshammer et al., 2006a; Moshammer und Neuberger, 2003; Ihorst et al., 2004; Horak et al., 2002; Frischer et al., 1997, 1999, 2001; Kopp et al., 2000) sowie Querschnittsstudien (Pattenden et al., 2006). Zur Bestimmung der Wirkung chronischer Belastungen wären zusätzliche Kohortenstudien wünschenswert. Wegen des hohen Aufwands und der langen Laufzeit derartiger Studien wären dafür allerdings besondere Finanzierungsschemata notwendig.

Smogwarnungen

Für mehrere Schadstoffe sind gesetzlich Schwellen zur Auslösung von Warnhinweisen vorgegeben (Immissionsschutzgesetz Luft BGBl. I 115/97 idgF; Ozongesetz BGBl. 210/92 idgF). Allerdings existieren, außer bei Ozonwarnungen, kaum praktikable Schutzmaßnahmen für den Einzelnen. Da die akuten Effekte der Schadstoffbelastung ohne erkennbaren Schwellenwert einer weitgehend linearen Konzentrations-Wirkungs-Beziehung folgen, ist es auch nicht einsichtig, welchen Sinn bestimmte gesetzlich vorgegebene Auslöseschwellen für Warnhinweise haben. Da Tage mit eher moderaten Schadstoffbelastungen häufiger auftreten als solche mit extremen Spitzenbelastungen, ereignen sich die meisten durch Luftschadstoffe verursachten Todesfälle an nicht extrem auffällig belasteten Tagen (WHO, 2005).

Was sollen ÄrztInnen wissen?

Das Wissen österreichischer ÄrztInnen bezüglich gesundheitlicher Auswirkungen von Luftschadstoffen ist gering. Auch wenn dieses Wissen kaum unmittelbare Anwendung in der therapeutischen Arbeit finden wird, so wird von ÄrztInnen auch eine generelle Kompetenz und Autorität in Fragen der Gesundheit und der Krankheitsprävention erwartet. Diesem Anspruch kann besser entsprochen werden, wenn präventivmedizinische und umwelthygienische Aspekte in der medizinischen Ausbildung verstärkt werden.

Aufgaben für das Gesundheitssystem

Derzeit nehmen Gesundheitsbehörden nicht an öffentlichen Debatten zur Luftreinhaltung zum Schutze der Volksgesundheit teil. Ein Teil der „Adaptation" besteht in (lokaler) Minderung der Schadstoffbelastung, beispielsweise durch Reduktion der Ozon-Vorläufersubstanzen. Die Reduktion von Schadstoffemissionen bedeutet nicht nur eine unmittelbare und lokal wirksame Reduktion von Gesundheitsschäden und Krankheitskosten. Einige der relevanten Substanzen sind entweder selber treibhausaktiv („black carbon") oder sind Vorläufer für derartige Spurenstoffe (Ozonvorläufer). Lokale Minderung als Adaptationsmaßnahme ist daher oft auch im Sinne globaler Minderung des Klimawandels. GesundheitsexpertInnen sollten geschult in systemischem Denken sein, um derartige „Win-Win-Strategien" glaubhaft vertreten zu können.

4.2.6 Von Vektoren übertragene Krankheiten

Medialer Fokus auf Malaria

Medial steht die Renaissance der Malaria in Mitteleuropa durch den Klimawandel im Mittelpunkt. Anophelesmücken waren stets in Europa heimisch und endemische Malaria ist aus früheren Epochen bis nach Nordeuropa beschrieben. Die Malaria ist nicht wegen des kühlen Klimas in Europa ausge-

storben, wenn auch ein wärmeres Klima die Übertragungsrate erhöht. Malariaplasmodien sind aber ausschließlich auf den Menschen als Wirt (und auf bestimmte Mückenarten als Zwischenwirt) angewiesen. Ein funktionierendes Gesundheitssystem stellt sicher, dass Menschen mit schweren Krankheitssymptomen (hohes Fieber und schwere Beeinträchtigung des Allgemeinzustandes) sich in der Regel nicht im Freien und insbesondere in der Nähe von Feuchtgebieten aufhalten, wo sie von Mücken gestochen werden können, was für die effiziente Übertragung der Erkrankung notwendig wäre. Im Zuge der Globalisierung von Tourismus und Warenverkehr ist es aber nicht auszuschließen, dass einzelne Malariafälle eingeschleppt werden und durch heimische Mücken vor Ort übertragen werden. Wenn dies auch noch keine epidemische Ausbreitung bedeutet, so wäre es doch angezeigt, wenn heimische ÄrztInnen in Zukunft bei den entsprechenden Symptomen auch an Malaria denken, was eine schnelle Diagnose und zumeist auch eine erfolgreiche Therapie ermöglicht.

Während Malaria nach derzeitigem Wissensstand nicht das gravierendste heimische Problem des Klimawandels darstellt, sind andere von Vektoren (z. B. Zecken, Insekten) übertragene Krankheiten bereits in Mitteleuropa etabliert oder kurz davor. Längere Warmphasen und höhere Temperaturen begünstigen sicher die Vermehrung mancher Vektoren und verkürzen die Generationszeiten von Krankheitserregern in den Kaltblütern (Semenza und Menne, 2009). In Band 2, Kapitel 6, sind die vektor-übertragenen Krankheiten sehr ausführlich dargestellt.

Überwachung von Vektoren und Erregern

In der Landwirtschaft ist die Überwachung bestimmter Ernteschädlinge etabliert, wenn auch deren Erfassung nur vereinzelt und stichprobenartig erfolgt. Über für die Gesundheit relevante Insekten und Spinnentiere (Arthropoden) existieren jedoch keine systematischen Aufzeichnungen in Österreich. Allenfalls durch private Initiative gibt es eine Erfassung von Zeckenpopulationen. Die Einrichtung eines Überwachungsnetzes mit der Etablierung von Insektenfallen in Anlehnung an Messeinrichtungen für Ernteschädlinge ermöglichte eine gezieltere Reaktion auf Änderungen der räumlichen Ausdehnung von Risikogebieten.

Auch die Überwachung der Erreger sowohl in den Zwischenwirten (vor allem Arthropoden) als auch in Wirtsorganismen (z. B. in Säugetieren und Vögeln) erfolgt bestenfalls in einzelnen wissenschaftlichen Studien. Für ausgewählte Erreger (z. B. das West-Nil-Virus) ermöglicht eine systematische Überwachung (z. B. durch eine gesetzlich verbindliche stichprobenweise Untersuchung von Tierkadavern) raschere und zielgerichtete Interventionsmaßnahmen. Die dafür notwendigen Laborkapazitäten und die Expertise sind in Österreich vorhanden, die Finanzierung und der gesetzliche Auftrag fehlen jedoch.

Aufzeichnung von Krankheiten

Die Aufzeichnung von Krankheiten ist eine der Kernaufgaben des Gesundheitswesens. Einige der interessierenden Krankheiten sind meldepflichtig, auf andere ließe sich die Meldepflicht problemlos ausdehnen. Die Meldedisziplin lässt allerdings zu wünschen übrig (Semenza et al., 2012). Es besteht daher die begründete Sorge, dass eine Epidemie einer von Vektoren übertragenen Erkrankung in Österreich so spät bemerkt würde, dass Präventionsmaßnahmen zu spät kämen.

Verknüpfung von Umwelt- und Gesundheitsdaten zu Infektionserkrankungen

Mangels verlässlicher Daten sind entsprechende Studien in Österreich nicht möglich. Studien aus anderen Ländern unterstreichen jedoch die Nützlichkeit derartiger Untersuchungen. Beispielsweise gibt es aus Ungarn sehr detaillierte Untersuchungen zu räumlichen und zeitlichen Änderungen im Auftreten und in der jahreszeitlichen Verteilung diverser durch Zecken übertragenen Krankheiten. Regional sehr unterschiedliche Faktoren (Klimaparameter, landwirtschaftliche und jagdliche Praktiken, ökologische Netzwerke) beeinflussen die Erkrankungsraten und erlauben daher eine frühzeitige Vorhersage von räumlichen und zeitlichen Risikobereichen. Nur so werden gezielte Vorsorgemaßnahmen und Warnhinweise möglich. Ohne lokale Studien zu Risikofaktoren sind vernünftige Warnhinweise nur eingeschränkt möglich bzw. beschränken sich auf sehr allgemeine Empfehlungen, wie z. B. den Schutz vor Mückenstichen oder Impfempfehlungen (FSME).

Lehrplan für MedizinstudentInnen

MedizinstudentInnen und junge ÄrztInnen sehen in ihrer Ausbildung und täglichen Arbeit Krankheiten, die bereits jetzt bei uns heimisch sind. Es sollte für sie kein Problem sein, wenn durch den Klimawandel ein Inzidenzanstieg erfolgt. Auch Tropenkrankheiten werden theoretisch im Lehrplan abgehandelt. Ohne praktisches Anschauungsmaterial besteht dennoch die Gefahr, dass einzelne Fälle nicht rechtzeitig diagnostiziert und daher nicht adäquat behandelt werden. Eine größere Internationalität der Medizinausbildung (Auslandssemester oder -praktika) ist daher wünschenswert.

Aufgaben für das Gesundheitssystem

Die angesprochenen Mängel bei den Datengrundlagen und die Notwendigkeit einer verlässlichen Überwachung sollten den Gesundheitsbehörden genügend sinnvolle Aufgaben bieten.

4.2.7 Qualität von Lebensmitteln und Trinkwasser

Verschiedene Einflussfaktoren

Vor allem Magen-Darm-Infektionen zeigen einen deutlichen saisonalen Verlauf, wobei die bakteriellen Erkrankungen durch Salmonellen und Campylobakter eine deutliche Häufung in der warmen Jahreszeit aufweisen, während Rotaviren im Winter dominieren. Die Bakterien vermehren sich unter anderem in Lebensmitteln, in Abhängigkeit von der Temperatur, die Viren dürften bei höheren Temperaturen und stärkerer UV-Einstrahlung in der Umwelt weniger lange überleben.

Änderungen in Stärke und Frequenz von Niederschlägen kann die Wasserqualität insgesamt beeinträchtigen, wobei insbesondere Starkregenereignisse nach längeren Trockenperioden gefährlich sein können. Neben der technischen Ausstattung der Trinkwassersysteme sowie der Kühlkette bei Lebensmitteln spielt auch die jeweilige Qualitätskontrolle bzw. behördliche Überwachung eine wichtige Rolle. Nicht zu vernachlässigen ist das Verhalten von Menschen: sind bakterielle Darminfekte im Sommer nur deshalb häufiger, weil die Bakterien sich bei höheren Umgebungstemperaturen rascher vermehren, oder spielen auch jahreszeitliche Gebräuche wie Zeltfeste und Grillpartys eine nicht unwichtige Rolle, die nicht von einer Änderung der Jahresdurchschnittstemperatur um einige Grad beeinflusst werden?

Zu den wiederkehrenden Witterungsereignissen mit Effekten auf die Gesundheit gehört auch die Trockenheit, die vor allem im ländlichen Raum die Wasserversorgung und -qualität nachhaltig beeinträchtigen kann. Wie sich beispielsweise im Raum Hartberg im extrem trockenen und heißen Sommer 2003 gezeigt hat, konnte die Wasserversorgung dort, wo sie auf kleine Quellen mit geringer Schüttung beruhte, nicht mehr gewährleistet werden. Vielfach wurde auch die erforderliche Qualität bei gleichbleibend intensiver Landwirtschaft nicht mehr erreicht. Ebenso können Starkregenereignisse, insbesondere nach einer längeren Trockenperiode, die Wasserqualität deutlich beeinträchtigen und etwa durch vermehrten Eintrag von organischem Material (Huminsäuren) die Desinfektionsleistung von Chlor bzw. durch Wassertrübung insgesamt besonders auch von UV-Anlagen stark verringern bzw. unwirksam machen.

Lebensmittel- und Trinkwasserkontrolle

Die Lebensmittel- und die Trinkwasserkontrolle zählen zu den wenigen Bereichen, in welchen bereits jetzt behördliche Aufgaben des vorbeugenden Gesundheitsschutzes gesetzlich vorgeschrieben und auch umgesetzt werden. Teilweise werden diese Kontrollfunktionen unter dem Schlagwort „weniger Staat" privatisiert und auf Grund von Sparzwängen reduziert, aber insgesamt stellen sie einen wichtigen Schwerpunkt in der Arbeit von Gesundheitsbehörden (AGES) dar. Die öffentliche Verfügbarkeit von Daten ist teilweise eingeschränkt. Sich immer wieder ereignende „Lebensmittelskandale" legen nahe, dass stichprobenweise Kontrollen nicht ausreichen und dass die behördliche Aufsicht manchmal träge reagiert. Andererseits haben die Behörden vorsichtig zu agieren, da auch eine Warnung, die sich später als Falschmeldung entpuppt, weitreichende Folgen nach sich ziehen kann (Scharlach et al., 2013; Soon et al., 2013).

Magen-Darm-Infekte

Bakterielle Darminfekte sind meldepflichtig. Tatsächlich ist eine hohe Dunkelziffer wahrscheinlich. Das hindert nicht die Untersuchung saisonaler Fluktuationen, doch längerfristige Trends lassen sich nur mit Vorbehalt aus den gemeldeten Erkrankungszahlen ableiten.

Weiterführende epidemiologische Auswertungen

Weiterführende epidemiologische Auswertungen sind durch die Unvollständigkeit der Krankheitsdaten erschwert. Aus anderen Ländern ist bekannt, dass nicht einzelne spektakuläre Massenausbrüche für den Großteil der Erkrankungen verantwortlich sind, sondern dass die vielen Einzelfälle in Summe viel mehr Schaden anrichten und dass auch diese zu einem nicht unwesentlichen Anteil durch Wasser und Lebensmittel übertragen werden (Cervenka, 1976). Zur Optimierung der Kontrollregime sind bessere Daten aus Österreich notwendig.

Information der Bevölkerung

Mitteilungen über Lebensmittelchargen, die wegen gesundheitlicher Bedenken aus dem Verkehr gezogen wurden, werden von den Medien als seltenes Ereignis effizient weiter verbreitet. Es gibt generelle Empfehlungen für Konsumenten, z. B. die

Lebensmittelhygiene bei Grillfesten oder auch in der Küche betreffend, sie könnten aber gezielter kommuniziert werden. Ratschläge zum Umgang mit Wasser nach einem Schaden am Trinkwassernetz (z. B. Überschwemmung mit dem Verdacht des Eintritts kontaminierten Wassers) werden im Anlassfall verbreitet. Wegen der Seltenheit solcher Anlassfälle kann der Erfolg solcher Ratschläge nicht abschließend beurteilt werden.

Wissenswertes für ÄrztInnen und andere Akteur-Innen im Gesundheitswesen

Das Wissen über die praktische Arbeit der Lebensmittelüberwachung ist auch unter GesundheitsexpertInnen begrenzt. Das Verständnis für den Sinn und die Notwendigkeit eines lückenlosen Meldewesens für diverse Krankheiten ist leider nur sehr mangelhaft ausgeprägt.

Behördliche Aufgaben

Eine traditionelle Kernaufgabe der Gesundheitsbehörden ist die Kontrolle der Qualität von Lebensmitteln und Trinkwasser. Daran wird sich auch durch den Klimawandel nichts ändern, wenn auch das Keimspektrum oder andere Bedrohungsszenarien sich in ihrer Bedeutung verschieben werden. Nur durch laufenden Vergleich verlässlicher Daten wird es möglich sein, neue Bedrohungsszenarien rechtzeitig zu erkennen, um Gegenmaßnahmen setzten zu können.

4.2.8 Pflanzen und Tiere mit allergenem und toxischem Potential

Grundsätzliche Überlegungen

Der Klimawandel führt gemeinsam mit Änderungen in der Landnutzung zu Verschiebungen im saisonalen und räumlichen Auftreten von Tieren und Pflanzen (Band 2). Als ein typisches Beispiel eines Neophyten[6], der bereits jetzt gesundheitliche Probleme macht, wird Ragweed in einem eigenen Unterkapitel etwas ausführlicher behandelt. Der Klimawandel führt zusätzlich auch zu Änderungen in der Pollensaison heimischer Pflanzen und zum Vorkommen der Hausstaubmilbe auch in höheren Gebirgsregionen, die AllergikerInnen bisher für Erholungs- und Kuraufenthalte empfohlen wurden. Nach Überschwemmungen oder Starkregenereignissen kann es zu Wasserschäden und nachfolgender Schimmelbildung in Gebäuden mit entsprechenden Gesundheitsfolgen (Moshammer, 2012) kommen. Änderungen der Wassertemperatur von Badeteichen kann eventuell das Auftreten von Zerkarien begünstigen. Bereits jetzt sehr warme Teiche könnten allerdings zu warm für diese Parasiten werden. Generell ist jedoch das entsprechende Habitat mit dem Vorkommen von Enten und Wasserschnecken wichtiger als die Wassertemperatur.

Prozessionsspinnerraupen lieben Eichen bzw. Kiefern an warmen Standorten. Massenhaftes Auftreten in der Nähe von Orten, die auch von Menschen frequentiert werden, kann zu einem epidemischen Auftreten juckender Hautausschläge führen, das erfahrungsgemäß häufig nicht korrekt diagnostiziert wird (Umweltbundesamt, 2010).

Algenblüten in Badeseen waren bisher eher Folge von Überdüngung. Änderungen der Wassertemperatur könnten eventuell toxische Algen begünstigen. In heißen Ländern kann der Klimawandel eventuell den Befall bestimmter Lebensmittel mit *Aspergillus flavus* verstärken (Battilani et al., 2012). Falls diese Lebensmittel nach Österreich importiert werden, ergibt sich daraus eine erhöhte Anforderung an die heimische Lebensmittelkontrolle.

All das sind nur Beispiele für mögliche gesundheitlich relevante Auswirkungen des Klimawandels auf Pflanzen und Tiere. Viele dieser Lebewesen sind bereits jetzt gesundheitlich relevant und erfordern daher adaptive Maßnahmen des Gesundheitswesens. Durch den Klimawandel wird ihre Bedeutung aber eventuell zunehmen. Verschiebungen im saisonalen und räumlichen Auftreten müssen in der zukünftigen medizinischen Lehre und Weiterbildung berücksichtigt werden, z. B. wird man eventuell die Indikationsstellung einer heilklimatischen Höhenkur für bestimmte AllergikerInnen überdenken müssen. Vielfach sind die Auswirkungen des Klimawandels jedoch im Detail noch nicht vorauszusehen und daher ist generell eine engmaschige Überwachung („Surveillance") auch von nicht-infektiösen Krankheiten durch das Gesundheitswesen notwendig.

Ragweed – Ein invasiver Neophyt mit allergenem Potential

Ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*) ist eine ursprünglich in Nordamerika beheimatete Pflanze, deren Vorkommen seit 1960 auch regelmäßig in Österreich wahrgenommen wird. Die Ausbreitung erfolgt langsam aber kontinuierlich in landwirtschaftlichen Flächen Südost- und Ostösterreichs, seit dem Jahr 2000 wird eine rasche Ausbreitung im urbanen Raum,

[6] Pflanzenart, die (in)direkt durch Menschen in Gebiete eingeführt wird, in denen sie natürlicherweise nicht vorkommt (Begriffserklärung Wikipedia)

insbesondere entlang linearer Korridore (Straßen, Wasserwege) beobachtet. Als Vektoren sind der Straßenverkehr, landwirtschaftliche Maschinen, verunreinigtes Saatgut, sowie Vogelfutter identifiziert worden. Die Invasion nach Österreich erfolgte einerseits über den Mittelmeerraum, andererseits von Osteuropa aus.

In Ostösterreich sind 30 % der AllergikerInnen sensibel auf Ragweedpollen (in Ungarn 80 %). Die Ambrosie kann möglicherweise einheimische Arten verdrängen, sogar eine Pioniereigenschaft wird diskutiert, wodurch die Biodiversität heimischer Ökosysteme gefährdet wird. Insbesondere zeigt die Pflanze bei einem Temperaturanstieg von 2 °C eine zunehmende Habitateignung und es ist daher von einer entsprechenden weiteren Ausbreitung in nördlicher Richtung auszugehen, mit der Konsequenz, dass auch die Kosten für das Gesundheitswesen entsprechend ansteigen.

Erste Anstrengungen, dem Problemunkraut Ragweed Herr zu werden, wurden im Jahre 2004 in Niederösterreich durch Implementierung eines Arbeitskreises und das Erstellen einer Befallskarte unternommen. Aufgrund des zunehmenden öffentlichen Interesses wurde schließlich unter Federführung der Universität für Bodenkultur (unter Beteiligung von AGES, NÖLAK, Universität Salzburg und Umweltbundesamt) ein dreijähriges Projekt ins Leben gerufen, welches vom Lebensministerium und acht Bundesländern finanziert wurde. Ziel war es, die biologischen Grundlagen der Ausbreitung der Ambrosie, aber auch konkrete Bekämpfungsmaßnahmen herauszufinden (Karrer et al., 2011).

Es konnte unter anderem gezeigt werden, dass die Verwendung von zertifiziertem Saatgut in der Landwirtschaft eine wichtige Präventionsmaßnahme ist, dass aber auch der „Arbeitsgerätehygiene" (Reinigung der Erntemaschinen nach Einsatz in einer betroffenen Ackerfläche) vermehrt Beachtung geschenkt werden muss. Auch zielgruppenorientierte Bekämpfungsstrategien für die Bereiche Straßenerhaltung (z. B. Zeitpunkt der Mahd) und Landwirtschaft (z. B. Fruchtfolge) wurden präsentiert.

Als Endpunkt dieses Projekts stehen nunmehr die Forschungsergebnisse in Form von Vorlagen für Vorträge und Folder, welche an die jeweilige Zielgruppe angepasst sind, zur Verfügung.

Es gibt bereits in mehreren Bundesländern Informationskampagnen auf unterschiedlichen Ebenen (z. B. Gemeindevertreter), nachhaltig wirksame Maßnahmen werden aber wohl nur durchgeführt werden können, wenn die vorrangig betroffenen Bereiche Landwirtschaft und Straßenerhaltung vermehrt in die Pflicht genommen werden.

Da die Bekämpfung von Ragweed teilweise schwer durchführbar ist, kann nur interdisziplinäre Zusammenarbeit erfolgreich sein, wobei jede Disziplin (Öffentlicher Gesundheitsdienst, Land- und Forstwirtschaft, Straßenbau und -erhaltung, Gartenbauämter und vergleichbare Stellen der Öffentlichen Verwaltung) im Sinne des WHO-Prinzips „health in all policies" in ihrem Bereich Verantwortung trägt. Das öffentliche Gesundheitswesen ist im Rahmen dieser Zusammenarbeit für die Bewusstseinsbildung bei den EntscheidungsträgerInnen der involvierten Fachbereiche sowie die Förderung der Beobachtung der Pollensituation und der epidemiologischen Allergiedaten zuständig.

4.2.9 Änderungen in der UV-Belastung

Dieser und die nachfolgenden Abschnitte sind anders strukturiert als die vorhergehenden. Hinsichtlich der UV-Belastung wird diskutiert, was der Klimawandel mit der UV-Belastung zu tun hat, wie UV-Strahlung auf die Gesundheit wirkt und welche Maßnahmen im Gesundheitsbereich getroffen werden können.

Was hat der Klimawandel mit der UV-Strahlung zu tun?

Die UV-Strahlung hat bis zur Jahrtausendwende vor allem in höheren geografischen Breiten wegen der Schädigung der stratosphärischen Ozonschicht zugenommen. Seit etwa dem Jahr 2000 scheint sich die Ozonschicht wieder zu erholen. Dies ist ein Erfolg des Montrealer Protokolls[7] (1987), das damit ein Beispiel für ein erfolgreiches internationales Abkommen darstellt und somit eventuell auch für internationale Übereinkommen zum Klimaschutz als Vorbild dienen könnte.

Stoffe für medizinische Anwendungen, insbesondere Treibgase für die inhalative Aufnahme von Therapeutika (z. B. Asthmasprays), hatten ein beträchtliches ozonzerstörendes Potential. Sie wurden inzwischen in Befolgung des Montrealer Protokolls durch andere Treibgase ersetzt, die zwar nicht mehr (sehr) ozonschädigend sind, aber immer noch klimawirksam im Sinne von Treibhausgasen sind. Dabei sind viele inhalative Darreichungen auch ohne Treibgase möglich, wie diverse pharmazeutische Produkte beweisen. Zum Teil ist die Inhalation von Medikamenten ohne die Verwendung von Treibgas für den Patienten sogar leichter zu erlernen, da er Einatmung und Betätigung des Pumpsprays nicht koordinieren muss.

Die UV-Strahlung wird auch von der Sonnenaktivität bestimmt. Die Sonnenaktivität, und zwar sowohl die insgesamt

[7] http://www.unep.org/ozonaction/

eingestrahlte Energie als auch deren spektrale Verteilung, ist auch ein wichtiger astronomischer Einflussfaktor des Klimas.

Die Dichte der stratosphärischen Ozonschicht wird nicht nur von anthropogenen Emissionen bestimmt, sondern unterliegt auch witterungsbedingten Schwankungen. Je nach Großwetterlage können in unterschiedlichem Ausmaß und Ausdehnung so genannte Ozonminilöcher entstehen, die etwa Flächen von der Größe Österreichs, des Alpenraums oder Mitteleuropas umfassen können. In den letzten Jahrzehnten beobachtet man Änderungen in der geografischen und jahreszeitlichen Verteilung dieser Minilöcher. Eventuell hat in Mitteleuropa die kurzfristige Variabilität der Ozonschicht-Dichte zugenommen. Damit würde auch die Variabilität der UV-Strahlung zunehmen (Simic et al., 2008).

Die Witterung beeinflusst auch das Verhalten der Menschen. Für deren UV-Belastung sind sowohl das Bekleidungsverhalten sowie die Häufigkeit und zeitlichen Muster beim Aufenthalt im Freien bedeutsam.

Letztendlich ist troposphärisches Ozon selbst auch ein Treibhausgas (THG). Ozonschicht, UV-Strahlung und Klima sind also auf vielfältigen Wegen miteinander verbunden.

Gesundheitseffekte von UV-Strahlung

Ultraviolettes (UV-)Licht ist energiereich. Im Frequenzspektrum elektromagnetischer Strahlung liegt es am Übergang zur ionisierenden Strahlung. Daraus resultiert die mögliche Schädigung oberflächennaher Strukturen (Haut, Augen) durch UV-Einwirkung. Durch vermehrte UV-Belastung werden Katarakt (Linsentrübung, Grauer Star), Netzhautschäden, Hautalterung und diverse Tumore der Haut und des Auges begünstigt, wobei je nach Pathologie eher die langfristig kumulierte Dosis oder die Intensität und Häufigkeit einzelner Spitzenbelastungen (Sonnenbrände), zum Teil vor allem in der Jugend, verantwortlich sind.

Andererseits haben sich mehrzellige terrestrische Organismen im Laufe der Evolution an ein Leben unter UV-Einwirkung angepasst und eine Reihe von Schutzmechanismen entwickelt, die von einer verstärkten Pigmentierung der Haut und des Haarkleides bis zu antioxidativen Stoffen und Reparaturenzymen reichen. Der Organismus nutzt die UV-Strahlung zur Bildung von Vitamin D in der Haut. Ethnien, die in sonnenärmeren Gebieten lebten, haben daher einen lichteren Hauttyp entwickelt und zeichnen sich in der Regel auch durch die Fähigkeit aus, lebenslang Milchzucker im Darm zu spalten und so (tierische) Milch als Quelle von Vitamin D als Erwachsene konsumieren zu können. Die Österreichische Ernährungsstudie (Elmadfa et al., 2012) fand Hinweise auf Vitamin D-Mangel:

„Die Messung der Plasmakonzentrationen an 25-OH-Vitamin D bei den Schulkindern zeigte, dass Vitamin D das kritischste fettlösliche Vitamin war, da hier die meisten Kinder verglichen mit den Referenzwerten von Hart et al. (2006) eine Unterversorgung aufwiesen. Bei 22 % der Mädchen und 18 % der Buben wurden stark erniedrigte Werte von unter 25 nmol / L gemessen, leicht erniedrigte Werte zwischen 25 und 50 nmol / L hatten 40 % der Mädchen und 38 % der Buben und ausreichend mit Vitamin D versorgt waren 38 % der Mädchen und 44 % der Buben. Niedrige Messwerte konnten zum Teil auf saisonale Schwankungen zurückgeführt werden, da ein Teil der Messungen in den Wintermonaten bei niedriger Sonnenlichtexposition durchgeführt wurde."

Zu bedenken ist auch die bakterizide Wirkung von UV-Strahlung, die inzwischen technisch zur Trinkwasserdesinfektion eingesetzt wird. Die Lungenheilanstalten des 19. Jahrhunderts wurden nicht nur deshalb in entlegenen Alpengegenden errichtet, um die Gesunden vor den Infizierten zu schützen, sondern auch deshalb, weil die häufige und intensive Sonnenstrahlung der Alpen die Gefahr einer Infektion bzw. Re-Infektion verringerte. Es ist plausibel, dass die geringere winterliche Sonnenstrahlung mit zur vermehrten Aktivität respiratorischer Infektionen beiträgt.

Unabhängig von der UV-Strahlung hat Sonnenlicht (mit seinem sichtbaren und Infrarot-Anteil) vielfältige positive physiologische und psychologische Wirkungen. Der Aufenthalt im Freien, der in der Regel unvermeidbar mit einer Exposition gegenüber UV-Strahlung einhergeht, ist nicht nur eine fallweise berufliche Notwendigkeit, sondern dient häufig der Erholung und fördert somit Gesundheit und Wohlbefinden. Die Exposition gegenüber UV-Strahlung ist in diesem Fall als „unbeabsichtigte" Nebenwirkung zu betrachten.

UV-Beratung als Aufgabe des Gesundheitssystems

Da von der UV-Strahlung sowohl negative als auch positive Wirkungen ausgehen, ist eine ausgewogene Information und Beratung der Bevölkerung im Sinne einer Verhaltensprävention notwendig. Diese muss zielgruppengezielt erfolgen, wenn sie das Verhalten der / des Einzelnen in eine für ihre / seine Gesundheit optimale Richtung verändern will. Um dies zu ermöglichen, bedarf es regelmäßiger Erhebungen des Sonnenverhaltens (einschließlich der Nutzung technischer Bräunungsgeräte) zumindest nach Alter und Geschlecht sowie nach wichtigen soziogeografischen Merkmalen gegliedert. „Sonne ohne Reue"-Folder und Infomaterial werden beispiels-

weise von der Österreichischen Krebshilfe[8] angeboten. Die Benutzung sowie Nutzungseinschränkungen für Solarien sind in der Solarien-Verordnung (BGBl. Nr. 147/1995) geregelt. In der Verordnung zu Maßnahmen für Gewerbetreibende bei der Verwendung von Solarien (BGBl. II Nr. 106/2010) ist die Nutzung für Personen vor Vollendung des achtzehnten Lebensjahres untersagt.

4.2.10 Migration („Klimaflüchtlinge")

Migration hat vielfältige Gründe und kann nur in einem gewissen Ausmaß staatlich reguliert und kontrolliert werden. Der Klimawandel im Süden wird einen zusätzlichen Migrationsdruck erzeugen. Daraus resultiert eventuell nicht nur mehr Migration, sondern auch Migration aus anderen Kulturen. Dies wird eine Anpassung des Gesundheitssektors an die mögliche Einschleppung von Krankheiten (Antibiotikaresistenz) erfordern. Es werden aber auch Fremdsprachenkenntnisse gefragt sein und der einfühlsame Umgang mit kulturellen Praktiken und Vorstellungen auch in Hinblick auf Gesundheit und Krankheit.

Wiederholte Überschwemmungen oder andere katastrophale Ereignisse können auch im Inland zum Aufgeben einzelner Siedlungen zwingen. Dies erfordert nicht nur neuen Wohnraum für die abgesiedelte Bevölkerung, vielmehr muss für sie unter anderem auch die nötige medizinische Infrastruktur bereitgestellt werden. Ebenso benötigen jene Personen entsprechende Hilfe, die nicht willens oder fähig sind, ihren alten Wohnsitz aufzugeben.

Drei Umstände haben im Problemfeld „Klimaflüchtlinge" besondere Bedeutung für das Gesundheitswesen:

- Der gewaltsame Verlust der Heimat durch klimawandelbedingte Veränderungen (Dürre, Überschwemmung, Wirbelstürme etc.) sowie eine Reihe durch Erwärmung bedingte Veränderungen in Flora, Fauna und im Meerwasser, die eine Fülle von Bedrohungen für die Gesundheit darstellen (Epstein und Ferber, 2011),
- Gesundheitsprobleme im Zusammenhang mit der Neuansiedlung und
- die Migration als adaptive Antwort („adaptive response") (McMichael et al., 2012).

Wo keine andere Lösung möglich ist, ist jedenfalls eine sinnvolle und zeitgerechte Umsiedlung zur Vermeidung von größeren medizinischen Problemen erstrebenswert.

Nach einer Schätzung des IPCC ist schon bis zum Jahr 2020 mit 74 bis 250 Millionen betroffenen Menschen zu rechnen (Piguet et al., 2011). Der afrikanische Kontinent dürfte am stärksten betroffen sein, was die Flüchtlingsströme in Richtung Europa voraussichtlich wesentlich verstärken wird. Bei einer Erwärmung um 4 °C ist mit noch größeren Migrationsbewegungen zu rechnen (Gemenne, 2011).

Ein weiteres Problem ist, dass Klimaflüchtlinge nach der Genfer Konvention über den Status von Flüchtlingen von 1951 keinen Flüchtlingsstatus haben, da sie nicht wegen der Zugehörigkeit zu einer bestimmten Rasse, Religion, Nationalität etc. verfolgt werden (Piguet et al., 2011). Dennoch benötigen diese Personen, die oft in mehrfacher Weise durch die genannten Umstände gesundheitlich schwer gefährdet oder geschädigt sind, einen besonderen Schutz (Roser und Seidel, 2013). Unabhängig von der allfälligen rechtlichen Beurteilung sind die Staatengemeinschaft und die politischen Verantwortlichen mit der steigenden Herausforderung konfrontiert.

Es ist klar, dass die Umsiedlung aller Betroffenen von Klimakatastrophen kein Ziel sein kann. Während aber akuten Katastrophen, wie dem Tsunami von 2004 oder dem Hurrikan Katrina von 2005, große Aufmerksamkeit geschenkt werden, ist die Zahl der Opfer des kontinuierlichen Klimawandels wesentlich größer. Hier bedarf es enormer Anstrengungen der Staatengemeinschaft im Sinne verschiedenster adaptiver und vorbeugender oder protektiver Maßnahmen (Piguet et al., 2011).

Klimawandel-bedingte Migration wird zum größten Teil in den Entwicklungsländern stattfinden. Sie ist selbst als eine Maßnahme der Adaptation zu verstehen (Barnett und Webber, 2010).

Der Umgang mit den Flüchtlingen wird in zunehmendem Maße Transnationale Kompetenz (TC) erfordern, neue analytische, emotionale, kreative, kommunikative und funktionelle Fertigkeiten, die auch in die spezielle Ausbildung medizinischen Personals zu integrieren sind (Koehn, 2006) – ganz abgesehen von einer grundlegenden Schulung des medizinischen Personals über die Zusammenhänge von Klimawandel und Gesundheit mit Hinweisen auf Maßnahmen, die vor allem in den Industrieländern rasch zu setzen sind (Restrepo, 2011).

4.2.11 Indirekte Wirkungen

Dieser letzte Abschnitt befasst sich mit möglichen Gesundheitseffekten von Maßnahmen der Minderung und der Adaptation. Da vielfältige Minderungs- und Anpassungsmaßnahmen auch unmittelbare Gesundheitsauswirkungen haben, sollten GesundheitsexpertInnen auch bei Maßnahmen der anderen Sektoren beigezogen werden. Diese Auswirkungen

[8] http://www.krebshilfe.net/information/sonne/sonne.shtm

können sowohl positiv als auch negativ sein. Von besonderer Bedeutung sind Maßnahmen, die die Emissionen von Treibhausgasen reduzieren und zugleich die Gesundheit verbessern.

Dazu gehören z. B. Projekte und Initiativen, die Radfahren und Gehen anstatt Autofahren fördern. Durch eine Reihe öffentlicher Maßnahmen, die den Radverkehr sicher und attraktiv machen, durch logistische Maßnahmen und durch die Kombination von Rad und Bahn ist hier viel mehr zu erreichen, als im Allgemeinen erwartet wird. „Integriertes Radfahren" ist erlernbar und sinnvoll. Bei dänischen Kindern und Jugendlichen, die per Rad oder zu Fuß in die Schule geschickt wurden, wurden nicht nur die positiven präventiven Wirkungen auf das Herz-Kreislaufsystem (de Geus et al., 2008) nachgewiesen, sondern auch zahlreiche weitere signifikant positive Gesundheitseffekte (Andersen et al., 2009). Erste Daten aus Österreich deuten in die gleiche Richtung (Moshammer, 2008, 2010).

Dass Radfahren fördernde und Autoverkehr eindämmende Maßnahmen greifen, zeigt eine vergleichende Analyse des Radfahrens in den Niederlanden, Dänemark, Deutschland, Großbritannien und den USA. Um 1950 waren die Zahlen der Radfahrer in den genannten Staaten annähernd gleich. In den folgenden Jahrzehnten ging in Großbritannien und den USA durch radfahr-feindliche und Autoverkehr fördernde Maßnahmen die Zahl der Radfahrer extrem zurück. Die Niederlande und Dänemark setzten jedoch dem Rückgang schon ab ca. 1970 sehr erfolgreiche Planungs- und Erziehungsmaßnahmen entgegen. Sie verzeichnen heute die höchsten Radfahreranteile bei größter Sicherheit (Pucher und Buehler, 2008).

Unter Berücksichtigung aller Risiken und Gesundheitsgefährdungen durch Radfahren, wie z. B. Unfälle etc., schneiden die Radfahrer wesentlich besser als die Autofahrer ab: wer vom Auto zum Fahrrad wechselt, gewinnt statistisch gesehen 3 bis 14 Monate Lebenszeit, während er nur einige Tage durch erhöhte Schadstoffexposition (0,8 bis 40 Tage) und Unfallrisiko (5 bis 9 Tage) verliert. Dazu kommen aber noch zahlreiche Vorteile, die Radfahrer der übrigen Gesellschaft durch Vermeidung von Lärm, Emissionen, Verringerung von Platzbedarf etc. bringen (de Hartog et al., 2010).

Wie viel Klimaschutz und Gesundheitsschutz durch Radfahren möglich ist, wird durch das Prinzip der dreifachen Entlastung („Triple Benefit Principle") (Renoldner, 2009) ersichtlich: es besteht aus gezielter Veränderung des Mobilitätsverhaltens, dabei erzielter Gesundheitsverbesserung und Investition der entstehenden Ersparnisse in die Bereitstellung sauberer Energie oder andere THG-senkende Projekte.

Als wichtige Richtlinie für Rad- und Geh-Planung, Politik und Förderkriterien können die „Health Economic Assessment Tools (HEAT) for Walking and Cycling" verwendet werden (Kahlmeier et al., 2011). Daraus geht auch hervor, dass ein Pendler, der drei Stunden pro Woche am Rad sitzt, sein Mortalitätsrisiko im Vergleich zum durchschnittlichen Autopendler um 28 % senkt. Eine Verdoppelung der Zeit auf sechs Stunden senkt das Mortalitätsrisiko sogar um 48 %, aber damit ist auch schon fast der statistische Plafond der asymptotischen Kurve erreicht, der bei 50 % liegt. Dieses Optimum von sechs Stunden wöchentlichem Radfahren liegt auch in einem Bereich, der keine großen Zeitverluste im Vergleich zum Autopendeln darstellt. Fast alle Menschen, die in einer Entfernung von 5 bis 10 km von der Arbeit oder einem Bahnhof leben, bringen ideale Bedingungen zur Umsetzung des Prinzips der dreifachen Entlastung mit. Entsprechende Maßnahmen und Förderungen haben somit großes Potenzial. Abgesehen vom Radfahren haben im häuslichen Bereich Klimaschutzmaßnahmen wie nachhaltigere Heiz- und Elektrizitätssysteme, nachhaltige Ernährung (nahe Produktion mit niedrigem Energieaufwand, wenig Fleisch) und ressourcenschonende Transportsysteme durch Schadstoff- und Expositionsverringerung zusätzlich gesundheitsfördernde Wirkungen (Haines et al., 2009).

Die Nebenwirkungen eines Umstiegs von fossilen auf nachwachsende Rohstoffe für Mobilität und Heizenergie sind allerdings vielfältiger (Hutter et al., 2011; Haluza et al., 2012) und erfordern daher eine genaue Abwägung. Aus gesundheitlicher Sicht werden insbesondere die fallweise deutlich höheren Emissionen von Luftschadstoffen kritisch gesehen. Energieeinsparung im Gebäudebereich geht häufig mit einer Reduktion der Luftwechselrate einher, welche durchaus nachteilige Folgen für die Luftqualität im Innenraum haben kann. Lüftungstechnische Anlagen können zwar einen optimalen Luftwechsel trotz minimaler Wärmeverluste sicherstellen, erfordern aber eine regelmäßige Wartung (Austrian Standards, 2003), welche erfahrungsgemäß nicht immer gewährleistet ist. Ob intelligente Stromzähler („Smart Meter") zu einer Einsparung beim Stromverbrauch beitragen, bleibt abzuwarten. Aus Sicht einer gesundheitlichen Vorsorge wäre jedenfalls darauf zu achten, dass durch die Einführung dieser Technologie keine zusätzliche Belastung der Wohnbereiche durch elektromagnetische Felder entsteht (BioInitiative Working Group, 2012).

Auch Anpassungsmaßnahmen können unerwartete Nebenwirkungen mit sich bringen. Die Kühlung bestimmter Innenräume ist als sinnvolle Anpassungsmaßnahme an mögliche Hitzewellen zu sehen. Die unkritische Installation und Anwendung von Klimageräten führt allerdings über den Anstieg des Energiebedarfs eventuell zu zusätzlicher Luftverunreinigung. Gesundheitliche Folgen sozialer Ungleichheit können verstärkt werden. Bedienungs- und Wartungsfehler bei

Klimaanlagen können durch Verkeimung der Leitungen und Filter aber auch durch fehlerhafte Temperatureinstellung mit zu starker Temperaturdifferenz zwischen Innen und Außen zu verschiedenen Beschwerden und sogar Krankheiten führen. Eventuell kann der unkritische Einsatz von Klimageräten gerade in Zeitabschnitten, wo Flüsse Niedrigwasser führen, zu einem Zusammenbruch der Stromversorgung führen und dann auch die Versorgung jener Personen gefährden, die darauf besonders angewiesen wären.

GesundheitsexpertInnen sollten auch in der Stadtplanung zu Wort kommen (Hitzeinseln, innerstädtischer Erholungsraum, Gestaltung öffentlicher Räume) sowie bei der Gestaltung von Arbeitszeiten (eventuell längere Ruhepause in der Mittagszeit, wie in südlicheren Ländern). Diese Beispiele zeigen, dass mögliche gesundheitlich relevante Maßnahmen sehr vielfältig sein können und dass daher auch die GesundheitsexpertInnen in diesen Bereichen geschult werden müssen, damit gesundheitliche Aspekte ausreichend vertreten werden können.

4.3 Tourismus
4.3 Tourism

4.3.1 Einleitung

Österreich ist international in Bezug auf den Tourismus eines der wettbewerbsfähigsten Länder. Der „Travel and Tourism Competitiveness"-Index des World Economic Forum (WEF) listet das Land 2013 im globalen Vergleich an 3. Stelle, in Bezug auf die Tourismusinfrastruktur liegt es sogar ex aequo mit Italien auf Platz 1. Im Kalenderjahr 2012 wurden in Österreich über 36,2 Mio. Gäste mit rund 131 Mio. Übernachtungen gezählt (Statistik Austria, 2013). Der Tourismus stellt daher auch einen bedeutenden Wirtschaftszweig in Österreich dar. Im Jahr 2012 beliefen sich die direkten Wertschöpfungseffekte des Tourismus – exklusive Dienst- und Geschäftsreisen – laut Tourismus-Satellitenkonto (TSA) auf 16 Mrd. €, was einem Anteil von 5,2 % am Bruttoinlandsprodukt entspricht. Unter Berücksichtigung der indirekten Effekte trug der Tourismus 22,8 Mrd. € bzw. 7,4 % zur Gesamtwertschöpfung bei (Statistik Austria, WKÖ, BMWFJ und ÖHT, 2013). Aufgrund seiner großen Bedeutung und der damit einhergehenden Beschäftigungseffekte leistet der Tourismus in Österreich auch einen wesentlichen Beitrag zur Gesamtbeschäftigung. Laut TSA-Beschäftigungsmodul, das die Beschäftigung in der bzw. hervorgerufen durch die Tourismuswirtschaft erfasst, waren im Jahr 2011, gemessen in Vollzeitäquivalenten, 254 500 selbstständige und unselbstständige Erwerbstätige den charakteristischen Tourismusindustrien direkt zuzuordnen, was einem Anteil von 7,2 % an den Erwerbstätigen der Gesamtwirtschaft entspricht (Statistik Austria, WKÖ, BMWFJ und ÖHT, 2013).

Einen besonders hohen Anteil weist dabei der alpine Wintertourismus auf. Einer von MANOVA im Auftrag des Fachverbands für Seilbahnen durchgeführten Studie zufolge wurde im Winterhalbjahr 2009 / 10 von den österreichischen Seilbahnen eine Wertschöpfung von 452 Mio. € generiert. Der Wertschöpfungsfaktor der Bergbahnen wurde auf 6,6 berechnet – d. h. das volkswirtschaftliche Einkommen, welches durch die Wintersportler in der Region anfällt, ist 6,6 mal höher als die reinen Löhne, Gehälter und Gewinne bei den Seilbahnunternehmen. Auf Basis dieses Wertschöpfungsfaktors konnte die Wertschöpfung aus dem bergbahnnutzenden Wintertourismus insgesamt für Österreich mit knapp 3 Mrd. € angegeben werden, was einem Bruttoumsatz von rund 5,56 Mrd. € entspricht (Fachverband der Seilbahnen Österreichs, not dated a).

Die touristische Nutzung ist in Österreich durch eine starke räumliche wie auch zeitliche Konzentration charakterisiert. So konnten etwa die Top-10-Tourismusgemeinden der Wintersaison 2011/12 (ohne Landeshauptstädte) 18,7 % aller Winternächtigungen verbuchen, während die zehn erfolgreichsten Tourismusgemeinden der Sommersaison 2010 für 11,2 % der Sommernächtigungen verantwortlich waren (Statistik Austria, WKÖ, BMWFJ und ÖHT, 2013). In touristisch intensiv genutzten Gemeinden kommen pro Tourismusjahr bis zu über 1 000 Nächtigungen auf einen Einwohner bzw. eine Einwohnerin (Prettenthaler und Formayer, 2011), wobei sich die tourismusintensiven Gemeinden vor allem auf den Westen des Landes konzentrieren (siehe Abbildung 4.1). So entfallen jährlich etwa 54 % aller Nächtigungen auf die beiden Bundesländer Tirol (knapp 35 %) und Salzburg (etwa 19 %).

Zeitlich konzentriert sich rund die Hälfte aller Übernachtungen auf die Monate Jänner, Februar, Juli und August. Insgesamt halten sich Sommer- und Wintertourismus im Bereich der Nächtigungen derzeit die Waage, nachdem über Jahrzehnte hinweg im Sommerhalbjahr eine sinkende bis stagnierende Tendenz, im Winterhalbjahr hingegen ein stark steigender Trend zu beobachten war (Statistik Austria, WKÖ, BMWFJ und ÖHT, 2013). In Kombination mit den höheren Einnahmen, die sich im Wintertourismus lukrieren lassen – laut dem Tourismus Monitor Austria[9] (2012) beliefen sich die durch-

[9] Der alle zwei Jahre durchgeführte Tourismus Monitor Austria

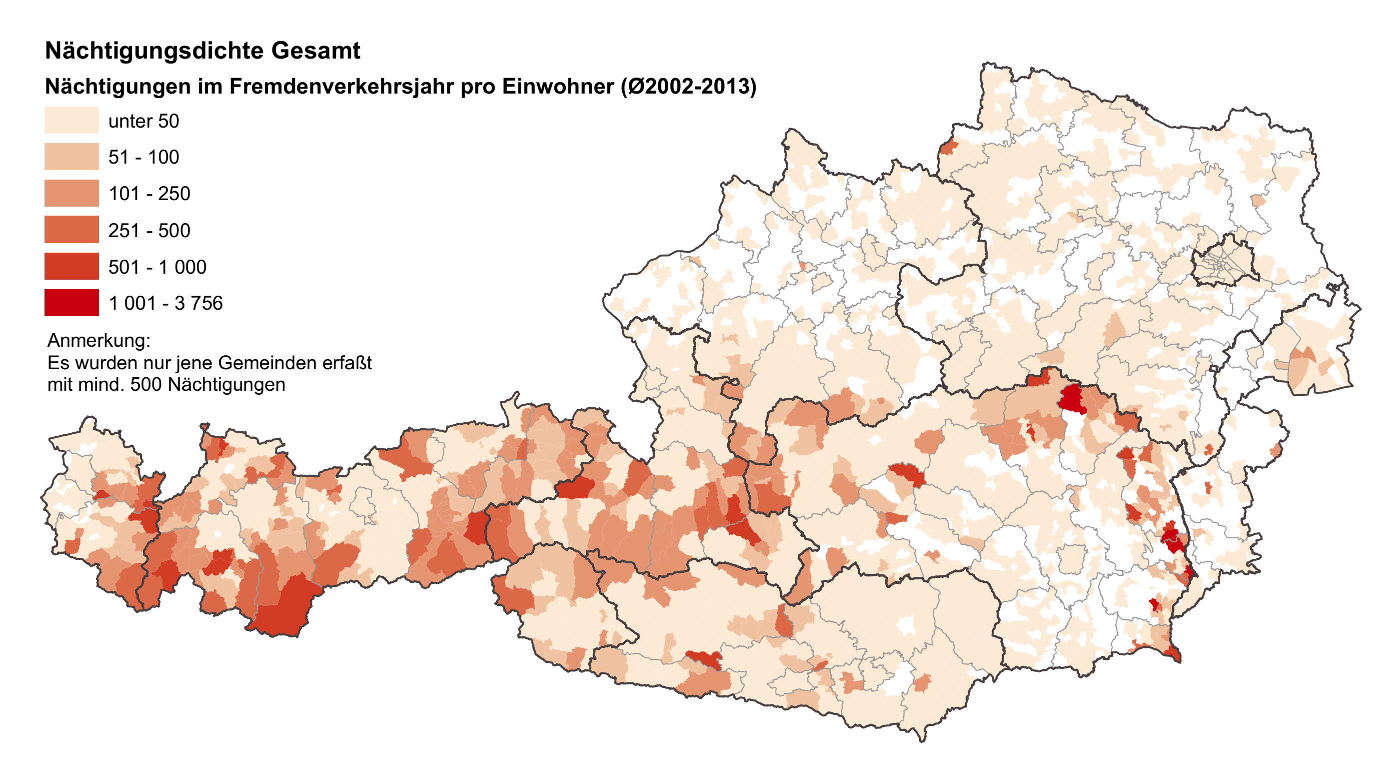


Abbildung 4.1 Nächtigungsdichte (Nächtigungen pro EinwohnerIn und Jahr) je Gemeinde. Quelle: Prettenthaler und Formayer (2011)
Figure 4.1 Overnight stays per inhabitant and year in Austria's municipalities. Source: Prettenthaler und Formayer (2011)

schnittlichen Tagesausgaben der UrlauberInnen in Österreich im Tourismusjahr 2011/12 im Winter auf 106 €, jene im Sommer hingegen nur auf 86 € pro Person (Österreich Werbung, 2012) – hat sich die Wintersaison somit zunehmend zum bedeutenden Wirtschaftsfaktor entwickelt. In Hinblick der zu erwartenden negativen Auswirkungen des Klimawandels, gerade im Wintertourismus (siehe Band 2, Kapitel 6), zeigt sich damit sehr deutlich die Vulnerabilität der österreichischen Tourismusindustrie.

Trotz österreichweiter Ausgeglichenheit zwischen Sommer- und Winterhalbjahr reicht die Palette auf lokaler Ebene von Gemeinden, die ausschließlich im Sommer touristisch erfolgreich sind – wie etwa das oberösterreichische Salzkammergut zwischen Mondsee und Traunsee, die Wachau, die Gemeinden um den Neusiedlersee oder ein Großteil der Kärntner Tourismusgemeinden – über Ganzjahresdestinationen bis hin zu Gemeinden am Arlberg und in den Ötztaler Alpen, die annähernd 100 % ihrer Nächtigungen während der Wintersaison verzeichnen (siehe Abbildung 4.2).

(T-MONA) ist eine der größten Gästebefragungen in ganz Europa, 2011/12 wurden über 36000 TouristInnen befragt. Das Projekt wurde gemeinsam von der Österreich Werbung, dem BMWFW, der WKO, der Firma MANOVA und den neun Landestourismusorganisationen entwickelt (Österreich Werbung, 2014).

Große lokale Differenzen bestehen allerdings nicht nur in Bezug auf den zeitlichen Nächtigungsschwerpunkt, sondern auch in Hinblick auf die wirtschaftliche Bedeutung, die der Tourismus in einzelnen Gemeinden einnimmt und die damit einhergehenden Abhängigkeitsstrukturen. In einzelnen Tourismusgemeinden kann beispielsweise der Anteil der im Beherbergungs- und Gaststättenwesen erwerbstätigen Personen über 80 % an den Gesamterwerbstätigen einnehmen (Prettenthaler und Formayer, 2011).

Aus dem Zusammenspiel der regionalen und lokalen Unterschiede, die hinsichtlich der zu erwartenden klimatischen Änderungen (siehe Band 1, Kapitel 4), der grundsätzlichen Klimasensibilität der jeweils angebotenen Tourismusaktivitäten und -attraktionen (siehe Band 2, Kapitel 6) sowie der wirtschaftlichen Bedeutung des Tourismus bestehen, ergeben sich somit auch regional und lokal differenzierte Anforderungen an adäquate Anpassungsstrategien (siehe Abschnitt 4.3.3). Neben den Herausforderungen, denen sich der Tourismus in Österreich infolge der Auswirkungen des Klimawandels zu stellen hat, fällt dem Sektor als Mitverursacher des Klimawandels allerdings auch im Bereich Minderung (siehe Abschnitt 4.3.2) Verantwortung zu.

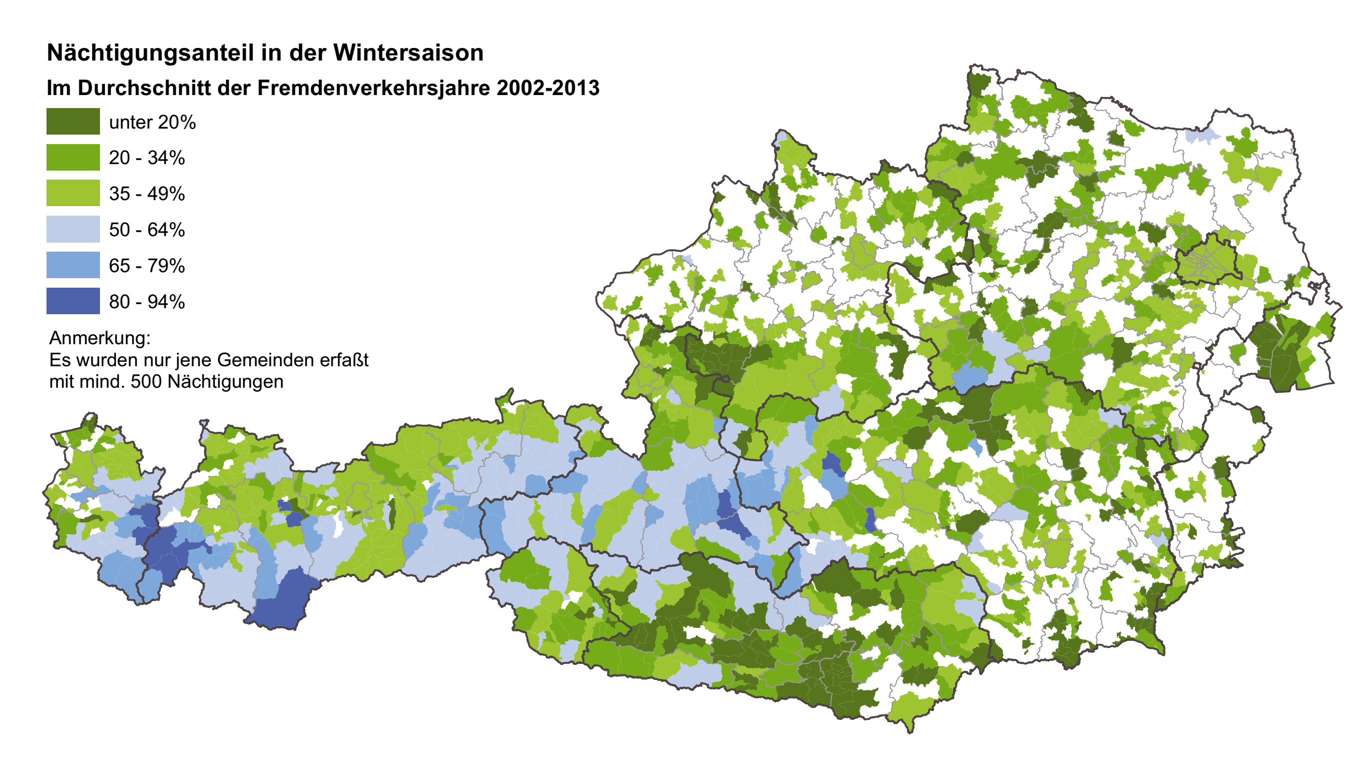


Abbildung 4.2 Nächtigungsanteil der Wintersaison am Fremdenverkehrsjahr je Gemeinde. Quelle: Prettenthaler und Formayer (2011)
Figure 4.2 Share of winter overnight stays in yearly overnight stays per municipality. Source: Prettenthaler und Formayer (2011)

4.3.2 Minderung – Der ökologische Fußabdruck des Tourismussektors und Wege, diesen zu verkleinern

Aufgrund seiner engen Verbindung zu naturräumlichen Gegebenheiten und klimatischen Bedingungen gilt der Tourismussektor als äußerst sensitiv gegenüber Änderungen im Klima (Band 2, Kapitel 6). Gleichzeitig trägt der Tourismus mit seinen THG-Emissionen, die insbesondere durch den Transport und die Beherbergung von Touristen anfallen, aber auch nicht unwesentlich zum Klimawandel bei (UNWTO-UNEP-WMO, 2008).

Der ökologische Fußabdruck des Tourismussektors

Schätzungen der UNWTO-UNEP-WMO (2008) zufolge waren die Tourismusbereiche Transport (Herkunft-Zielort), Beherbergung und sonstige Aktivitäten[10] im Jahr 2005 mit 1,3 Mrd. t für rund 5 % der globalen CO_2-Emissionen verantwortlich[11]. Mit 75 % entfiel der Großteil dieser CO_2-Emissionen auf den Touristentransport, wobei allein schon der Lufttransport – obwohl nur bei 17 % aller Tourismusreisen das gewählte Verkehrsmittel – für etwa 40 % der Gesamtemissionen verantwortlich war. Weitere 32 % entfielen auf das Auto und 3 % auf sonstige Verkehrsmittel. Beherbergung und sonstige Aktivitäten trugen 21 bzw. 4 % zu den globalen CO_2-Emissionen des Tourismussektors bei. Gemessen am Strahlungsantrieb[12] („radiative forcing" bzw. RF) belaufen sich die Schätzungen der UNWTO-UNEP-WMO (2008) in Bezug auf den Beitrag des Tourismus zur Klimaerwärmung hingegen auf bis zu 9 %, wobei der Anteil des Flugverkehrs am Gesamtbeitrag des Tourismussektors mit bis zu 75 % ungleich höher ausfällt als bei ausschließlicher Betrachtung der CO_2-Emissionen (siehe Abbildung 4.3).

[10] Sonstige Aktivitäten umfassen den Transport vor Ort, alle lokalen Freizeitaktivitäten, Geschäftsaktivitäten (Meetings, Konferenzen), Besuche von Restaurants, Bars und Cafés, Ausflüge in der Umgebung der Destination, etc.

[11] Die Schätzungen beinhalten internationale und inländische Touristenreisen sowie Tagesausflüge.

[12] Der Strahlungsantrieb misst das Ausmaß, in dem Treibhausgasemissionen die globalen Durchschnittstemperaturen erhöhen. Die UNWTO-UNEP-WMO (2008) schätzt den am Strahlungsantrieb gemessenen Beitrag des Tourismus zur Klimaerwärmung sowohl unter Ausschluss des Effekts Kondensstreifen induzierter Zirruswolken als auch unter (maximaler) Berücksichtigung des genannten Effekts.

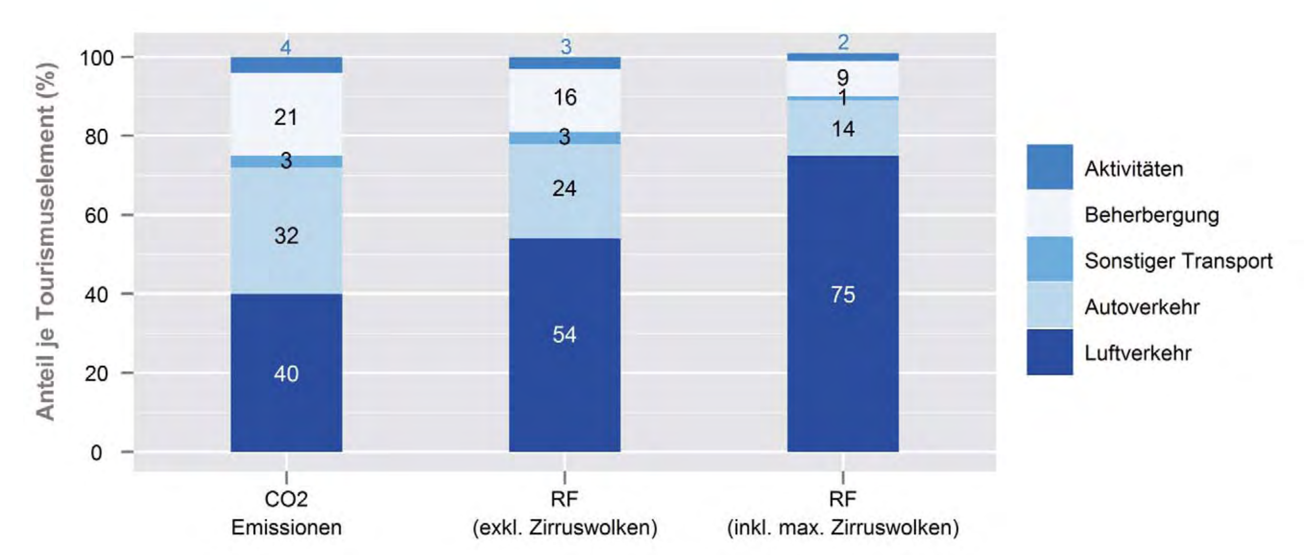


Abbildung 4.3 Geschätzter Anteil der Tourismusaktivitäten an CO2 Emissionen und Strahlungsantrieb des Tourismus (inklusive Tagestourismus), 2005. Adaptiert von UNWTO-UNEP-WMO (2008)

Figure 4.3 Estimated share of tourism activities to tourism CO2 emissions and radiative forcing (including same-day visitors), 2005. Adapted from UNWTO-UNEP-WMO (2008)

In ihrem „Business-As-Usual"-Szenario, das von einer weiter steigenden Tourismusnachfrage, einem weiteren Anwachsen der Fernreisen und einer Fortsetzung des Trends zu häufigeren und dafür kürzeren Urlauben ausgeht, erwartet die UNWTO-UNEP-WMO (2008) im Falle des Ausbleibens umfassender bzw. in angemessenem Ausmaß stattfindender Minderungsbemühungen bis 2035 eine Steigerung der globalen CO_2-Emissionen des Tourismussektors im Ausmaß von 161 % gegenüber dem Basisjahr 2005. In Hinblick auf das erwartete dynamische Wachstum der Tourismusaktivitäten scheint eine Reduktion der Emissionen unter das Niveau von 2005 nur durch eine Kombination unterschiedlicher Minderungsmaßnahmen – Steigerung der Energieeffizienz in allen Bereichen bei gleichzeitiger Senkung des Energieverbrauchs durch Änderungen des Modal Split (d. h. der Verkehrsmittelwahl) im Transportbereich und einer Verlagerung zu kürzeren Reisedistanzen sowie längeren durchschnittlichen Aufenthaltsdauern – möglich (UNWTO-UNEP-WMO, 2008).

Für Österreich liegen derzeit (2013) kaum Untersuchungen zu den THG-Emissionen des gesamten Tourismussektors vor. Besonders für die Entwicklung und Implementierung möglichst effektiver Minderungsstrategien und zur Identifikation jener Bereiche, die den stärksten Handlungsbedarf aufweisen, stellen möglichst detaillierte Informationen zu den durch Tourismusaktivitäten verursachten THG-Emissionen allerdings eine wichtige Voraussetzung dar. Diesbezügliche Untersuchungen gibt es für Österreich derzeit nur in Bezug auf den alpinen Wintertourismus, dessen CO_2-Emissionen Gegenstand einer Studie von Friesenbichler (2003) sind. Den darin enthaltenen Schätzungen zufolge verursachten die Bereiche „Wintersportinfrastruktur" (Aufstiegshilfen, Beschneiungsanlagen, Pistengeräte etc.), „Verkehr" (An- und Abreiseverkehr sowie Verkehr am Urlaubsort), „Beherbergung" und „Gastronomie" an die 3,9 Mio. t CO_2 je Wintersaison, was etwa 5,6 % der im Jahr 2001 österreichweit verursachten CO_2-Emissionen entspricht[13]. Mit 58 % entfiel dabei der größte Anteil der verursachten CO_2-Emissionen auf den Beherbergungsbereich, gefolgt vom An-, Abreise- und Zubringerverkehr mit 38 %. Seilbahnen, Schlepplifte, Pistengeräte und Schneekanonen waren den Ergebnissen zufolge hingegen nur für 4 % der gesamten schneebasierten Wintertourismus-Emissionen verantwortlich. Will man im Wintertourismus Emissionen vermindern, sollte, den Ergebnissen zufolge, demnach vor allem bei Heizung und Warmwasserverbrauch in Hotels sowie einer besseren Erreichbarkeit der Skigebiete mit der Bahn angesetzt werden. Was die Emissionen von Seilbahnbetrieben betrifft, wurde in Kooperation mit der OITAF[14] ein Modellvorhaben zur Carbon-Foot-Print-Berechnung anhand der Skilifte Lech entwickelt (Pröbstl und Jiricka, 2012a). In den Gesamtemissionen zeigte sich, dass neben dem Einsatz erneuerbarer Energieträger vor allem beim Pistenmanagement ein wichtiger Beitrag zur Reduktion der THG-Emissionen geleistet werden kann.

[13] Es gilt allerdings zu beachten, dass ein Teil der 3,9 Mio. t CO2 durch die An- und Abreise ausländischer Gäste außerhalb Österreichs anfällt.

[14] Umweltausschuss der OITAF (Organizzazione Internationale Transporti A Fune)

Zu verstärkten CO_2-Emissionen kommt es auch durch die Durchführung touristischer Großveranstaltungen. So verursachte beispielsweise die zweitägige Airpower 2013 in Zeltweg nach Angaben von Gegnern der Veranstaltung rund 500 t CO_2 (ORF, 2013). Dieser Wert wäre anhand einer Untersuchung über die dadurch geschaffenen Arbeitsplätze zu relativieren und in Relation zur CO_2-Intensität anderer Branchen zu setzen. Der Aspekt der CO_2-Intensität sollte bei der Frage nach der Sinnhaftigkeit und der Planung von Veranstaltungen berücksichtigt werden. Im besten Fall können Großveranstaltungen auch Anlass für Innovationen zum Klimaschutz geben, wie die Ski-WM 2013 in Schladming vorzeigte. Im Rahmen dieses Events wurden unter anderem energieeffiziente Pistenfahrzeuge angeschafft, eine Photovoltaikanlage am Dach des „Congress-Schladming" errichtet und ein Shuttledienst mit Elektrobus eingerichtet; die Wärmeversorgung der WM-relevanten Einrichtungen erfolgte durch Biomasse aus dem Nahwärmenetz. Die Emissionen in den zwei WM-Wochen, einschließlich der Anreise der BesucherInnen (insgesamt wurden 300 000 Tages-, Wochen- und WM-Tickets verkauft), wurden dennoch mit immerhin 1 290 t CO_2-Äq. beziffert (ÖSV, 2013). Im Vergleich dazu beliefen sich die jährlichen Emissionen von CO_2-Äq. pro Kopf in Österreich im Jahr 2012 auf 9,5 t (EEA, 2013b).

Möglichkeiten zur Minderung im Tourismussektor

Grundsätzlich lassen sich nach Becken und Hay (2007) vier Hauptvermeidungsstrategien in Bezug auf tourismusverursachte THG-Emissionen unterscheiden:

- Reduzierung des Energieverbrauchs, beispielsweise durch Veränderungen im Transportverhalten oder in Bezug auf die Managementpraktiken von Beherbergungsbetrieben,
- Verbesserung der Energieeffizienz durch den Einsatz neuer und innovativer Technologien zur Reduzierung der Energienachfrage[15],
- Steigerung des Anteils erneuerbarer oder CO_2-neutraler Energie, indem fossile Brennstoffe beispielsweise durch Biomasse, Wasserkraft, Wind- und Solarenergie ersetzt werden,
- Bindung von CO_2 durch Kohlenstoffsenken, umweltorientierter Tourismus kann dabei indirekt eine Schlüsselrolle bei der Erhaltung natürlicher Gebiete mit kohlenstoffbindenden Eigenschaften spielen.

Der größte Teil der im Tourismusbereich verursachten THG-Emissionen entfällt auf den Transport und die Beherbergung von TouristInnen. Will man die Emissionen des Tourismussektors merklich reduzieren, müssen Minderungsmaßnahmen demnach insbesondere in diesen Bereichen ansetzen.

Minderung im An-, Abreise- und Vor-Ort-Transport

Werden im Verkehrssektor Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz und/oder der Steigerung des Anteils erneuerbarer Energie implementiert, bewirkt dies bei gleich bleibendem Reiseverhalten automatisch eine Verringerung der vom Tourismussektor verursachten THG-Emissionen. Darüber hinaus stehen dem Tourismussektor aber auch Maßnahmen zur Verfügung, um pro-aktiv die durch den Touristentransport verursachten Emissionen zu senken.

Eine mögliche Minderungsmaßnahme, die unter die Strategie der Reduzierung des Energieverbrauchs fällt, stellt die Verschiebung der Transportmittelwahl weg von Auto und Flugzeug hin zu Zug und Bus dar (UNWTO-UNEP-WMO, 2008). Dem Tourismus-Monitor von Österreich Werbung, Landestourismusorganisationen und MANOVA zufolge reist derzeit eine überwältigende Mehrheit der in- und ausländischen Österreich-Gäste – nämlich 81 % – mit dem eigenen PKW an. Weitere 7 % wählen das Flugzeug als Anreisemittel. Nur 4 bzw. 3 % entscheiden sich für Bahn bzw. Bus, während jeweils 2 % der Gäste mit Wohnwagen/-mobil oder Motorrad anreisen (WKO, 2011). Unter Berücksichtigung der Ergebnisse von Friesenbichler (2003), wonach der An-, Abreise- und Zubringerverkehr für 38 % der CO_2-Emissionen des schneebasierten Wintertourismus verantwortlich ist, liegt in der Verschiebung des Modal Split des Touristentransports ein beachtliches Einsparungspotenzial. Voraussetzung für das Gelingen einer solchen Verschiebung ist – neben der Bewusstseinsbildung bei Anbietern wie auch Gästen[16] – vor allem die Schaffung der dafür notwendigen Infrastruktur. Eine Studie des Umweltbundesamts (2009) zur Erreichbarkeit alpiner Tourismusstandorte mit dem öffentlichen Verkehr aus bedeutenden Großstädten Europas ortet je nach Herkunftsland und Rei-

[15] Laut Fachverband der Seilbahnen (not dated b) konnten beim Energieverbrauch der Beschneiung durch technische Verbesserungen deutliche Einsparungen erzielt werden, heutzutage braucht man für die Erzeugung von 1 m^3 Kunstschnee 1 kWh, in den 1980er Jahren hingegen benötigte man für dieselbe Menge noch 7 kWh.

[16] Zu erwähnen ist hier beispielsweise eine Informationsbroschüre zu Angeboten für die Anreise mit Bahn und Postbus zu touristischen Destinationen in ganz Österreich, welche 2013 von der ÖBB mit Unterstützung des BMWFJ herausgegeben wurde (BMWFJ und ÖBB, 2013).

seziel allerdings z. T. noch erhebliche infrastrukturelle Schwächen in Bezug auf die Attraktivität einer autofreien Anreise. Große regionale Unterschiede herrschen auch in Hinblick auf die Mobilität vor Ort, wo die Palette in den 13 untersuchten Regionen von mangelhaften bis hin zu sehr gut ausgebauten öffentlichen Verkehrsnetzen reicht. Will man eine deutliche Erhöhung der autofreien Anreisen erreichen, sind gezielte Maßnahmen im Verkehrs- und Tourismusbereich, und zwar sowohl auf regionaler, nationaler wie auch auf internationaler Ebene notwendig. Vorgeschlagen wird diesbezüglich in besagter Studie unter anderem

- die Schaffung einheitlicher Plattformen mit umfassenden Informationen zur autofreien Anreise,
- die Schnürung nationaler und internationaler „Packages", die neben Anreise und Mobilität vor Ort zusätzlich auch Leistungen wie Nächtigung oder diverse Eintritte enthalten,
- die Einrichtung zusätzlicher, saisonaler Zugverbindungen sowie, wo notwendig,
- die Verdichtungen und Anpassungen der regionalen Fahrpläne und der Einsatz spezieller öffentlicher Verkehrsmittel zu touristischen Attraktionen in Zeiten hoher Nachfrage.

Auf lokaler Ebene können beispielsweise Gästekarten zur kostenlosen Fahrt mit öffentlichen Verkehrsmitteln oder das Angebot von (Elektro-) Fahrrädern zum Ausleihen die PKW-Nutzung verringern (BMWFJ, WKO und ÖHV, 2011).

Neben den positiven Auswirkungen auf die Emissionsbilanz des Tourismussektors hätte eine bessere Erreichbarkeit der österreichischen Tourismusdestinationen mittels öffentlicher Verkehrsmittel sowie eine Verbesserung der Mobilität vor Ort auch den Vorteil, die Vulnerabilität des Tourismussektors gegenüber künftig zu erwartenden Energiepreissteigerungen zu reduzieren. Eine Reduktion des Individualverkehrs kann sich zudem durch die damit verbundene Senkung der Lärm- und Schadstoffbelastung im Ort auch positiv auf die Attraktivität einer Gemeinde als Erholungsort auswirken (BMWFJ, WKO und ÖHV, 2011).

Die Schaffung umweltfreundlicher Mobilitätsangebote – insbesondere von Angeboten, um sich ohne PKW vor Ort fortbewegen zu können und, damit zusammenhängend, auch die Förderung der aktiven Mobilität (z. B. Rad fahren) – wurde daher auch in Hinblick auf den Bereich Infrastruktur und Mobilität als eine der zentralen Herausforderungen der österreichischen Tourismusstrategie 2010 genannt. Eine Studie zur Tourismusmobilität in Österreich, welche in weiterer Folge vom BMWFJ in Auftrag gegeben wurde, kam jedoch zu dem Ergebnis, dass es hier bislang zu wenig Kooperation zwischen Tourismuswirtschaft und Verkehrsdienstleistern gibt (TU Wien, 2013). Im Rahmen der österreichischen Tourismusstrategie 2013 soll die Zusammenarbeit zwischen Tourismus und öffentlichem Verkehr nun ausgebaut werden. Zudem ist die Ausarbeitung eines Leitfadens geplant, der die Tourismuswirtschaft dabei unterstützen soll, die Gäste über alternative Mobilitätsangebote zu informieren (BMWFJ, 2013). Vereinzelt wurden und werden Maßnahmen hin zu einer sanften Mobilität im Tourismus bereits umgesetzt (siehe hierzu auch BMVIT, not dated a und BMVIT, not dated b). Zu den Good-Practice-Beispielen zählt unter anderem die Gemeinde Werfenweng, die sich seit mehreren Jahren auf eine autofreie Anreise spezialisiert und neben verschiedenen Anreiseangeboten auch vielfältige Angebote hinsichtlich der Mobilität vor Ort entwickelt hat.[17] So konnte in Werfenweng beispielsweise der Anteil der mit der Bahn anreisenden Dauergäste im Winter durch Maßnahmen zur Erleichterung der Bahnanreise laut BMVIT (not dated a) von 9 auf 25 % gesteigert werden, was zeigt, dass sich das Mobilitätsverhalten durch Gesamtkonzepte und Angebote durchaus beeinflussen lässt. Zusammen mit Hinterstoder, Neukirchen am Großglockner, Mallnitz und Weißensee gehört Werfenweng zu den fünf österreichischen Gemeinden des derzeit (Juni 2014) aus insgesamt 29 alpinen Urlaubsorten bestehenden internationalen Netzwerk der „Alpine Pearls", das sich dem sanft-mobilen Reisen verschrieben hat (siehe Abbildung 4.4).[18]

Ein weiteres Good-Practice-Beispiel für sanfte Mobilität ist der „Tälerbus"[19], der in den Regionen Lungau, Murau, Nockberge, Schladming-Rohrmoos und Sölk mit der Bahn anreisende Gäste vom Bahnhof abholt und zu ihrem Ferienziel bringt, aber auch viele Ausflugsziele und Wandermöglichkeiten ansteuert. In den Ferien sind die Tälerbusse auf andere Verkehrsmittel wie Seilbahnen, Züge und Postbusse abgestimmt. Weitere bereits erfolgte Maßnahmen umfassen regionale Projekte hinsichtlich Fahrplan-Auskunfts- und Reiseinformationssystemen sowie Bewusstseinsbildung (weitere Details siehe BMVIT, not dated a).

Neben der Verschiebung der Transportmittelwahl hin zu öffentlichen Verkehrsmitteln würde auch die Verlängerung der durchschnittlichen Aufenthaltsdauer zu einer Reduktion des Energieverbrauchs beitragen. Der derzeitige Trend im Urlaubsverhalten läuft allerdings in die entgegensetzte Richtung. Seit Jahren nimmt die durchschnittliche Aufenthaltsdauer der Österreich-Gäste kontinuierlich ab. Während sie beispielswei-

[17] http://www.werfenweng.eu/de/sanfte-mobilitaet
[18] http://www.alpine-pearls.com
[19] http://www.taelerbus.at



Abbildung 4.4 Das 28 alpine Urlaubsorte umfassende Netzwerk der „Alpine Pearls". Quelle: www.alpine-pearls.com
Figure 4.4 The network of „Alpine Pearls", comprising 28 Alpine holiday destinations. Source: www.alpine-pearls.com

se im Jahr 1995 noch bei 4,8 Tagen lag, betrug sie im Jahr 2012 nur noch 3,6 Tage (Statistik Austria, 2013). Potenzial für Maßnahmen zur Verlängerung der durchschnittlichen Aufenthaltsdauer wird vor allem den Reiseveranstaltern durch entsprechende Ausgestaltung der angebotenen Produkte zugeschrieben, wie beispielsweise dem Offerieren einer kostenlosen Zusatzübernachtung ab einem Aufenthalt von sechs Nächten (UNWTO-UNEP-WMO, 2008). Da die Tendenz zu einer kürzeren Aufenthaltsdauer – die nicht nur in Österreich, sondern weltweit zu beobachten ist – zum Teil eine Folge neuer Konsumentencharakteristiken und Verhaltensweisen ist, wird eine Umkehrung dieses Trends insgesamt allerdings als nicht ganz einfach eingestuft (Alegre und Pou, 2006).

Hilfreich für die Setzung zielgerichteter Maßnahmen können als erster Schritt Erhebungen des Mobilitätsverhaltens der Gäste – wobei hier vor allem auf regionaler Ebene noch Aufholbedarf besteht (Umweltbundesamt, 2009) – sowie Untersuchungen zur Akzeptanz möglicher Alternativen sein. Eine Grundlagenstudie von Fleischhacker et al. (2009) kam auf Basis einer Online-Befragung zu dem Ergebnis, dass die Mehrheit der österreichischen UrlauberInnen bislang wenig Interesse an klimaschonenden Verhaltensweisen zeigt – und das obwohl sie tendenziell gut über den Klimawandel und seine Ursachen Bescheid wissen. Die höchste Akzeptanz besteht noch für das Umsteigen von PKW oder Flugzeug auf die Bahn im Falle gleich guter Erreichbarkeit, dies ist für fast die Hälfte der Reisenden vorstellbar (etwas mehr als ein Fünftel der Reisenden tut dies auch schon heute). Ähnlich hoch ist der Anteil der Reisenden, die sich vorstellen können, ein Reiseziel in näherer Umgebung zu wählen, um dadurch den Anfahrtsweg zu verkürzen. Geringere Akzeptanzraten gibt es dagegen in Hinblick auf das Wählen eines langen anstatt mehrerer kurzer Aufenthalte (30 % der Winter- bzw. 42 % der SommerurlauberInnen), auf den Verzicht von Flugreisen (27 bzw. 37 %) und das gezielte Wählen von Destinationen, die mit öffentlichen Verkehrsmitteln zu erreichen sind (25 bzw. 27 %).

Minderung im Beherbergungsbereich

Ein hohes Einsparungspotenzial in Bezug auf tourismusverursachte THG-Emissionen wird neben dem Transportwesen auch im Beherbergungsbereich gesehen. So wurde etwa der überwiegende Teil der gewerblichen Beherbergungsbetriebe in Österreich während der 1960er und 1970er Jahre erbaut, als Nachhaltigkeit und Energieeffizienz noch keine besonders große Rolle spielten (Formayer und Kromp-Kolb, 2009). Im Jahr 2008 schätzte die Österreichische Hoteliervereinigung (ÖHV) den jährlichen CO_2-Ausstoß der rund 19 000 gewerblichen Beherbergungsbetriebe auf 1,8 Mio. t (OÖNachrichten, 2008). Das BMWFJ, die Wirtschaftskammer Österreich

(WKO) und die ÖHV stellen seit 2009 für Unternehmen aus Hotellerie und Gastronomie einen umfassenden Leitfaden zum Energiemanagement zur Verfügung (BMWFJ, 2009), welcher 2011 in 2. Auflage erschienen ist. Darin werden Einsparungsmaßnahmen in den Bereichen Gebäudehülle, Heizung, Warmwasser, allgemeiner Wasserverbrauch, Lüftung und Gebäudekühlung, Kühlanlagen, Küche, Wellness, Wäscherei, Licht und Einsatz energieeffizienter Geräte vorgestellt. Durch ein umfassendes Sanierungskonzept können der Studie zufolge bei Gasthöfen und Hotels, abhängig vom aktuellen Zustand des Gebäudes, mitunter mehr als die Hälfte der Energiekosten eingespart werden (BMWFJ, WKO und ÖHV, 2011). In Beherbergungsbetrieben höherer Kategorie werden insbesondere auch dem dort üblichen Wellnessbereich, der einen hohen Energiebedarf aufweist, beachtliche Einsparungspotenziale zugeschrieben (Fromayer und Kromp-Kolb, 2009). Zudem sind weitere Emissionseinsparungspotenziale durch Umstieg auf erneuerbare Energieträger gegeben, da ein beachtlicher Anteil der Beherbergungsbetriebe mit Öl beheizt wird – noch 2001 wurde in 63 % der Hotels und ähnlichen Gebäude mit Gebäudezentralheizung Heizöl als Brennstoff verwendet (Statistik Austria, 2004). Darüber hinaus können Beherbergungsbetriebe auch außerhalb ihres eigenen Bereichs wesentliche Beiträge zur Minderung des Klimawandels leisten, z. B. durch die Verwendung regionaler und saisonaler Produkte oder die Vermeidung und Trennung von Müll. Detaillierte Untersuchungen zum Emissionseinsparungspotenzial im gesamten Beherbergungsbereich liegen aktuell (2013) nicht vor.

Es gibt derzeit (2013) unterschiedlichste Förderungen für Klimaschutz- und Energiesparmaßnahmen auf kommunaler, Landes- und Bundesebene[20], wie etwa die „Mustersanierungsoffensive“ des Klima- und Energiefonds, in deren Rahmen seit 2008 ambitionierte, umfassende Sanierungen von gewerblichen Beherbergungsbetrieben gefördert werden, das Angebot kostenloser Energiechecks oder geförderter Langberatungen zur Energieeffizienzsteigerung etc. Wichtige Impulse werden auch durch eine umweltbezogene Zertifizierung erreicht. Von den Beherbergungsbetrieben, die eine Zertifizierung durch das österreichische Umweltzeichen durchführten, gaben 60 % an, v. a. im Energiebereich deutliche Einsparungen erzielt zu haben, die sogar weit über ihren eigenen Erwartungen lagen (Pröbstl und Müller, 2012). Aufgrund der Auditierung wurde auch im Energiebereich überproportional investiert (Pröbstl und Müller, 2012).

Ein Good-Practice-Beispiel für Minderung im Beherbergungsbereich stellt beispielsweise das „Boutique-Hotel Stadthalle“ in Wien dar[21]. Hierbei wurde ein bestehendes Gebäude thermisch vollsaniert und der angrenzende Zubau im Passivhausstil konstruiert, dessen Energiebedarf vollständig durch Solaranlage, Fotovoltaikanlage, Grundwasserwärmepumpen und noch in Betrieb zu nehmende Windräder gedeckt wird. Als wahrscheinlich weltweit erstes Null-Energie-Bilanz Hotel im urbanen Raum erhielt es 2010 den Österreichischen Klimaschutzpreis in der Kategorie „Landwirtschaft und Gewerbe“[22]. Das erste Passivhaus-Schwimmbad Österreichs im „Hotel Edelweiss Wagrain“[23], ein weiteres Good-Practice-Beispiel, führt gegenüber vergleichbaren herkömmlichen Spa-Bereichen zu einer Halbierung des Energieverbrauchs (Scheuriach, 2011).

Minderung durch Anpassung des betrieblichen Managements von touristischen Anlagen

Unabhängig von der Anreise weisen die verschiedenen touristischen Aktivitäten einen sehr unterschiedlichen Energieverbrauch auf. Der Grund dafür ist die jeweils unterschiedlich ausgeprägte Inanspruchnahme von Infrastruktur. Zu den sparsamsten Aktivitäten zählen etwa Reiten, Wandern, Segeln und Surfen sowie Radfahren und Mountainbiking. Als tendenziell energieintensiv können hingegen unter anderem der Gesundheits- und Wellnessbereich, Kunsteisbahnen oder das alpine Skifahren eingestuft werden (Formayer und Kromp-Kolb, 2009; Veit, 2002).

Alpines Skifahren

Im Zuge der Untersuchung dreier Kärntner Skigebiete findet Steiner (2010) einen elektrischen Energieverbrauch für Aufstiegshilfen und Beschneiung von 7,5 bis 11,9 kWh / Ersteintritt sowie einen Treibstoffbedarf für Pistenpräparierung von 0,48 bis 0,56 l / Ersteintritt (Durchschnitt der Wintersaisonen 2005 / 06 bis 2009 / 10). Als Benchmark kann demgegenüber der durchschnittliche Stromverbrauch der Schweizer Bergbahnen mit 5,3 kWh / Ersteintritt gelten, wobei bei aktivem Energiemanagement das Einsparungspotenzial auf rund 15 % geschätzt wird (Zegg et al., 2010).

Im Zusammenhang mit einer speziell für Seilbahnen entwickelten Carbon-Footprint-Berechnung und deren Anwendung im Bereich der Skilifte Lech (Vorarlberg) zeigte sich, dass ein hohes Einsparpotenzial beim Pistenmanagement be-

[20] siehe hierzu auch www.umweltfoerderung.at

[21] http://www.hotelstadthalle.at/

[22] http://www.klimaschutzpreis.at

[23] http://www.mein-edelweiss.at/

steht (Pröbstl und Jiricka, 2012a). 70 % des Dieselverbrauchs entfielen auf diesen Bereich und unterstreichen daher das Einsparpotenzial durch ein optimiertes Präparierungskonzept, bei dem u. a. auch Pistenflächen temporär unpräpariert bleiben können. Weitere Einsparungen lassen sich durch das Schneemanagement, insbesondere durch Schneemessung bei der Präparation und die dadurch mögliche Einsparung von technischer Beschneiung, erzielen. Hier werden aus den Erfahrungen der Betreiber erzielbare Energieeinsparungen von zumindest 15 % genannt[24]. Des Weiteren zeigte die Carbon-Footprint-Berechnung auch, dass wesentliche Beiträge durch die Nutzung erneuerbarer Energieträger erzielt werden können. Bei Verwendung von 100 % Ökostrom wäre bei den Skiliften Lech eine Einsparung von 750 t CO_2-Äq. erreichbar. Dies entspricht rund einem Drittel der gesamten Emissionen des Betriebs (Pröbstl und Jiricka, 2012a).

Was den Einsatz erneuerbarer Energieträger im Skibetrieb betrifft, sind in Österreich bereits einige umgesetzte Projekte sowie Projektvorhaben zu finden. So plant etwa die Schmittenhöhebahn AG (Zell am See) in den nächsten Jahren den Bau von bis zu 4 000 m² Fotovoltaikanlagen, mit denen etwa 10 % des gesamten Energieverbrauchs der Schmitten abgedeckt werden könnten (Schmittenhöhebahn AG, 2012), während eine auf dem Wildkogel in 2 100 m Seehöhe installierte Fotovoltaikanlage bis zu 75 % des Strombedarfs der Wildkogelbahnen (Salzburg) deckt (ORF, 2011). Die Skilifte Lech (Vorarlberg) verwenden ebenfalls eine Fotovoltaikanlage, die jährlich rund 8 850 kWh Strom erzeugt, setzen aber auch Geothermie für die Gebäudeheizung ein (Pröbstl und Jiricka, 2012a). Auch eine im Winter 2012 / 13 neu in Betrieb genommene Sesselbahn der Illwerke am Golm in Vorarlberg bezieht ein Drittel der benötigten Energie aus Sonnenenergie. Die Besonderheit dieser Anlage ist, dass die Fotovoltaikanlage hier direkt in die Stationsbauten integriert wurde (Illwerke Tourismus, 2014). Am Salzstiegl (Steiermark) versorgt eine Windkraftanlage das Skigebiet mit Strom. Durch die zeitliche Divergenz von Angebot und Nachfrage – insbesondere zu Beschneiungszeiten – muss allerdings zum Teil auch Strom aus dem Netz bezogen werden. Der Anteil des direkt durch die Windkraftanlage gedeckten Strombedarfs wird auf etwa 45 % geschätzt. Der geplante weitere Ausbau der Windkraftanlage in Kombination mit einem Pumpspeicherkraftwerk soll in Zukunft eine weitgehende Selbstversorgung des Skigebiets gewährleisten (Frühwald, 2009). Bei den Bergbahnen See (Tirol) werden hingegen die Schneeleitungen für die Beschneiungsanlage außerhalb des Beschneiungsbetriebs zur Stromerzeugung als Druckleitungen für ein Wasserkraftwerk verwendet[25]. Forschungsprojekte an der Universität für Bodenkultur (BOKU) stellen wiederum die Voraussetzungen für die Nutzung von Schnittgut der Skipisten als Grundlage für die Energiegewinnung aus Biomasse zusammen (Theurezbacher et al., 2012). Dies ist für jene Skigebiete eine wichtige Option, in denen sich die Landwirtschaft aufgrund der ungünstigen Produktionsbedingungen zurückzieht.

Entscheidend bei den genannten Minderungsmaßnahmen ist neben der Effizienz allerdings auch die Akzeptanz bei den UrlauberInnen, da eine Beeinträchtigung des landschaftsästhetischen Potenzials die Möglichkeiten einer Diversifizierung des touristischen Angebots in Richtung Ganzjahrestourismus (siehe Abschnitt 4.3.3) negativ beeinflussen kann. Im Hinblick auf Windkraft und Wintersport liegen bereits kritische Akzeptanzstudien aus Finnland vor (Tyrvainen et al., 2012), die dort zur Ablehnung der Anlagen geführt haben. Aus ähnlichen Gründen wurde auch in Bayern von einer Entwicklung der Windkraft im touristisch sensiblen Alpenraum abgesehen (Bayerisches Staatsministerium des Inneren et al., 2011). Differenzierte Studien in vier Skigebieten in Österreich (Skilifte Lech am Arlberg, Planaibahnen in Schladming, Schmittenhöhebahn in Zell am See und Silvretta Nova) zeigen eine geringe Akzeptanz von großen, freistehenden Windkraftanlagen in alpinen Tourismusgebieten im Sommer und Winter (Pröbstl et al., 2011a). An bestehende Infrastruktur angepasste und in die Landschaft schonend eingebundene Anlagen, wie z. B. kleine Biomasseanlagen oder die energetische Nutzung einer Beschneiungsanlage, werden von TouristInnen im alpinen Bereich hingegen deutlich besser bewertet (siehe Abbildung 4.5). Dies ist deshalb wichtig, da die landschaftliche Schönheit für die Stärkung einer multi-saisonalen Tourismuswirtschaft – als wichtige Anpassungsstrategie im alpinen Bereich (siehe Abschnitt 4.3.3) – ein besonders wichtiges Kriterium für die Destinationswahl ist (Pröbstl und Jiricka, 2012b).

Gesundheits- und Wellnessbereich

Neben dem alpinen Skifahren zählt auch der Gesundheits- und Wellnessbereich zu den energieintensiven touristischen Aktivitäten. Sofern keine oder nicht ausreichend ergiebige Quellen für die Wärmeerzeugung verfügbar sind, kann der Energiebedarf im Gesundheits- und Wellnessbereich

[24] Erfahrungswerte der Planai-Bahnen

[25] http://www.see.at/de/umweltschutz-bergbahnen-see (Stand: Jänner 2013).

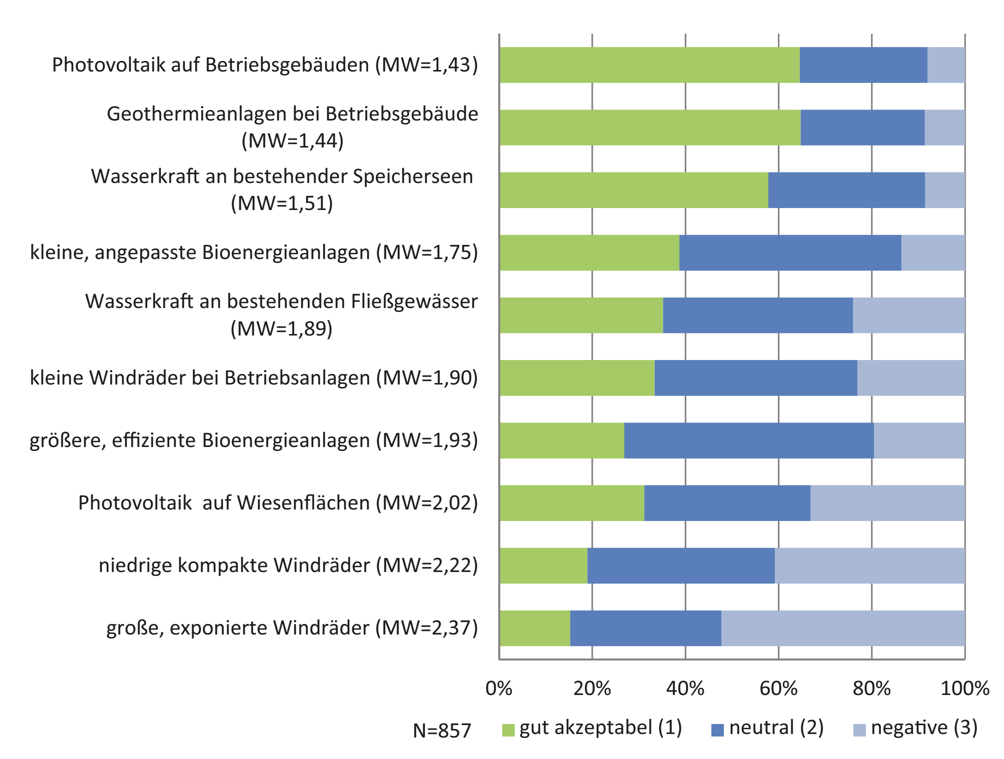


Abbildung 4.5 Akzeptanz von erneuerbaren Energieträgern in Bezug auf die Landschaft. Quelle: Pröbstl et al. (2011a)

Figure 4.5 Acceptance of renewable energy sources regarding the landscape. Source: Pröbstl et al. (2011a)

den Energiebedarf des Wintersports sogar deutlich übertreffen (Formayer und Kromp-Kolb, 2009). Die Therme Meran (Italien) beispielsweise wies 2009 einen Stromverbrauch von 14,7 kWh pro Gast auf, das Familienbad Zernez (Schweiz) einen Verbrauch von 20,8 kWh pro Gast (Zegg et al., 2010). Emissionseinsparungen sind auch hier durch Optimierungen im Energieverbrauch sowie den Umstieg auf regenerative Energiequellen möglich. Das Passivhaushallenbad „Bambados“ in Bamberg (Deutschland) benötigt im Vergleich zu einem herkömmlichen Schwimmbad 60 % weniger Energie und verursacht 80 % weniger CO_2-Emissionen (Austrotherm, n.d.).

4.3.3 Anpassung im Tourismus

Grundsätzlich wird die Kapazität der Tourismusindustrie, sich an Klimaänderungen anzupassen, aufgrund ihrer Flexibilität als relativ hoch eingestuft (UNWTO-UNEP-WMO, 2008). Allerdings geht man davon aus, dass die Anpassungskapazität zwischen den Subsektoren der Tourismusindustrie deutlich variiert. Die höchste Anpassungskapazität innerhalb der Tourismusindustrie wird den Erholungssuchenden selbst attestiert, die durch die Wahl der Destination sowie der Reisezeit unvorteilhafte klimatische Bedingungen grundsätzlich meiden können. Vergleichsweise geringer fällt die Anpassungskapazität aus, die Reiseveranstaltern und -büros sowie Transportunternehmen zugeschrieben wird, während man bei Beherbergungsbetrieben, lokalen Besucherattraktionen, lokalen Veranstaltern sowie Destinationsgemeinden von der geringsten Kapazität zur Klimawandelanpassung innerhalb der Tourismusindustrie ausgeht (Scott und Jones, 2006; UNWTO-UNEP-WMO, 2008). Nachdem es sich beim Tourismussektor zudem um einen stark nachfragegetriebenen Bereich handelt (Prideaux et al., 2009; McKercher, 1998), wird das von Gästen zu Tage gelegte Anpassungsverhalten Einfluss auf die Anpassungserfordernisse der anbietenden Tourismusakteure nehmen. Die internationale Tourismusforschung empfiehlt jedoch, vorausschauende Strategien zu entwickeln (Dwyer et al., 2009; Pröbstl-Haider und Haider, 2013).

Prinzipiell steht der Tourismusindustrie eine Vielzahl an Anpassungsoptionen zur Verfügung, die von technologischen bis hin zu management- und verhaltensbezogenen Maßnahmen reicht (UNWTO-UNEP-WMO, 2008). Einige dieser verfügbaren Maßnahmen können sich allerdings aufgrund ihres hohen Ressourcenbedarfs, etwa in Bezug auf den Energie- oder Wasserverbrauch oder die Flächenbeanspruchung, auch negativ auf die Klima- und Umweltverträglichkeit des Tourismus auswirken. Ein prominentes Beispiel ist die Beschneiung,

aber auch das vermehrte Anbieten wetterunabhängiger Attraktionen, etwa in Form von Wellnesseinrichtungen, Freizeitparks oder Kunsteisbahnen, kann sich emissionserhöhend auswirken (siehe Abschnitt 4.3.2). Dasselbe gilt auch für verhaltensbezogene Anpassungsmaßnahmen der Urlaubsgäste selbst, etwa wenn aufgrund fehlender Schneesicherheit auf weiter entfernte Skigebiete ausgewichen wird. Diese Ausweichbewegungen in höher gelegene Schigebiete sind empirisch gut dokumentiert (Töglhofer et al., 2011). Für die daraus resultierende interessante Frage, welche (Kombination aus) Anpassungsmaßnahmen aus Vermeidungssicht tatsächlich besser sind, liegen in Österreich unseres Wissens momentan (2013) noch keine Untersuchungen vor.

Darüber hinaus wird von verschiedenen AutorInnen betont, dass die Entscheidungsfindung im Tourismus stark von der Kommunikation des Themas Klimawandel und Adaptation abhängt (Stehr und von Storch, 1995; Grothmann und Patt, 2005; Gössling et al., 2012). Pröbstl (1998) zeigte, dass die UrlauberInnen, die mehr als 200 km von den Alpen entfernt wohnen, eher von negativen Umweltauswirkungen der Beschneiung ausgehen, als solche, die näher zu den Skiregionen wohnen und diese auch vom Sommerbesuch kennen. Ergebnisse von Grabler und Kulnig (2007) bestätigen dies, bezogen auf die Wahrnehmung des Klimawandels, auch für Österreich.

Wie solche Anpassungsszenarien am Beispiel von Langlaufdestinationen in Österreich aussehen könnten, wird von Landauer et al. (2012) vorgestellt. Dabei zeigt sich, dass Gebiete durch Beschneiung und Serviceverbesserung (Umkleideräume etc.) ihre Attraktivität behalten können. Eine teilweise Refinanzierung erscheint durch Gebühren bis zu 8 € möglich. Naturferne Anpassungsstrategien, die in anderen Ländern durchaus erfolgreich sind, wie ein Langlauftunnel, werden dagegen abgelehnt. Landauer et al. (2013) unterstreichen die Bedeutung kultureller Unterschiede im Hinblick auf die Akzeptanz von Anpassungsstrategien, die je nach Herkunft der Urlauberströme ebenfalls zu beachten ist. So zeigten u. a. auch deutsche und niederländische Urlaubsgäste eine hohe Empfindlichkeit im Hinblick auf das Landschaftsbild im Sommer (Pröbstl et al., 2011a).

Nachdem sich die zu erwartenden Auswirkungen des Klimawandels je nach geographischer Region und Marktsegment unterscheiden (vgl. Band 2, Kapitel 6) und auch der relative Anteil des Tourismus an der lokalen oder regionalen Wirtschaft innerhalb Österreichs variiert, sind Dringlichkeit für und Möglichkeiten zur Anpassung je nach Region und Marktsegment ebenfalls unterschiedlich.

Allgemeine Anpassungsmaßnahmen

Eine allgemeine und vielfach genannte Strategie zur Anpassung an den Klimawandel stellt die Diversifizierung des Angebots dar (z. B. Elsasser und Bürki, 2002; Dubois und Ceron, 2006; OECD, 2007; UNWTO-UNEP-WMO, 2008). Ein gemischtes Angebotsportfolio weist bereits aufgrund des impliziten Versicherungseffektes ein geringeres Gefährdungspotenzial auf, als ein einseitig ausgerichtetes Angebot (Prettenthaler et al., 2011). Destinationen, die stärker diversifizierte Wirtschaftspositionen, KundInnen, Beherbergungsbetriebe und Attraktionen aufweisen, sind demnach gegenüber Umweltänderungen resistenter, als Destinationen mit einseitiger Orientierung. Zudem schränkt Diversifizierung die Sensitivität gegenüber wirtschaftlichen und anderen Krisen ein (Dubois und Ceron, 2006). Eng mit der Diversifizierung des Angebots verbunden ist auch die häufig genannte Strategie der Forcierung bzw. des Ausbaus des Ganzjahrestourismus, etwa durch saisonale Angebote in den Bereichen Gesundheit, Kultur und Bildung (AustroClim, 2008b; Formayer und Kromp-Kolb 2009, BMLFUW 2012b). Eine Studie des BMWFJ (2012) weist auf den Gesundheitstourismus als besonders gering sensitiv im Hinblick auf den Klimawandel hin. Als weiteres nur gering sensitives Segment ist der Kongresstourismus zu erwähnen.

Andere AutorInnen empfehlen und diskutieren eine stärkere Orientierung und Suche nach nachhaltigen Nischenprodukten, die auf die Bedürfnisse ihrer jeweiligen Klientel zugeschnitten sind oder in innovativer Form neue Segmente ansprechen können (Sloan et al., 2012; Pröbstl und Müller, 2012; Jiricka et al., 2012). Sloane et al. (2012) stellen in diesem Zusammenhang die Bedeutung auch im Hinblick auf eine ökonomische touristische Entwicklung an internationalen Fallbeispielen heraus. In Österreich zeigen sich diese unter anderem in der erfolgreichen Entwicklung von zertifizierten Angeboten. Hierzu gehören in Österreich u. a. die Natur-Idyll-Hotels oder die Bio-Hotels mit einer klaren Positionierung und einem Qualitätsversprechen durch eine gemeinsame „nachhaltige" Marke (Pröbstl und Müller, 2012).

Städtetourismus

Nach derzeitigem Erkenntnisstand wird davon ausgegangen, dass der Städtetourismus – etwa im Gegensatz zum schneebasierten Wintertourismus – weniger stark vom Klimawandel betroffen sein wird, wobei die Übergangszeiten von der erwarteten Erwärmung profitieren, die Sommermonate allerdings durch vermehrt auftretende Hitzewellen hingegen negativ beeinflusst werden könnten (Band 2, Kapitel 6). Bedarf an

Anpassungsmaßnahmen besteht im Städtetourismus demnach vor allem in Hinblick auf erhöhte Hitzebelastung.[26] Basierend auf einer Befragung von Städtereisenden nach Wien und einer Diskussion mit Fachleuten identifizieren Allex et al. (2011) unter anderem die Verbesserung der Trinkwasserversorgung der BesucherInnen, etwa durch Erhöhung der Trinkbrunnen- und Wasserspenderanzahl, sowie die verstärkte Vermarktung der guten Trinkwasserqualität in Österreich als wichtige Komponenten einer Anpassungsstrategie an erhöhte Hitzebelastung. Als weitere bedeutende Komponenten werden etwa die Verbesserung der Aufenthaltsqualität der Gäste im Freien – etwa durch Begrünung und Beschattung tourismusrelevanter Orte und Routen und die Erstellung eines „Hitze-Stadtplans", d.h. die Bereitstellung hitzerelevanter Informationen und hitzeangepasster Besichtigungsprogramme – sowie die Forcierung energieeffizienter Kühlung in touristisch genutzten Einrichtungen genannt.

In einigen der genannten Bereiche wurden und werden Maßnahmen bereits umgesetzt. Aktivitäten zur Erhöhung der Trinkbrunnenzahl finden beispielsweise in Wien statt, wo 2011 sieben neue, mobile Anlagen an touristisch stark frequentierten Orten aufgestellt und 2010 ein Aufsatz zur Nutzung von Hydranten als Trinkbrunnen getestet wurde (Allex et al., 2011). Zudem kann ein Großteil der Trinkbrunnenstandorte im Online-Stadtplan der Stadt Wien abgerufen werden. In Graz und Linz stellt hingegen etwa die Begrünung von Straßenbahngleisen eine Maßnahme zur Reduktion von Aufheizungseffekten dar, die bereits teilweise angewandt wird (Allex et al., 2011).

Sommertourismus mit Schwerpunkt Baden

Auswirkungen des Klimawandels auf den Badetourismus sind komplex und daher differenziert zu betrachten (siehe Band 2, Kapitel 6). Hinweise auf Anpassungsstrategien finden sich bei Chladek (2005), BMLFUW (2009), Pröbstl (2011), Pröbstl et al. (2012) und Greil (2011). Dabei zeigt sich, dass zwischen den alpinen Seen und dem Angebot im Bereich des Neusiedler Sees unterschieden werden muss.

Befragungen von TouristInnen und ZweitwohnungsbesitzerInnen am Attersee ergaben, dass die zu erwartenden Zunahmen von Temperatur und Sonnenscheindauer positiv aufgenommen werden. Die Auswirkungen auf die regionale Wertschöpfung durch die beiden Gruppen werden jedoch unterschiedlich ausfallen. Während die ZweitwohnungsbesitzerInnen angeben, sich bei den angeführten Änderungen häufiger im Gebiet aufzuhalten (80 %), sind die UrlauberInnen zwar ebenfalls positiv beeinflusst, allerdings jedoch nicht in der Lage ihr Verhalten zu ändern, da die Anzahl der Urlaubstage begrenzt ist und die Anreiselänge negativ ins Gewicht fällt. Die Verhaltensunterschiede können mit dem höheren Einkommen der ZweitwohnungsbesitzerInnen, der höheren Altersstruktur (viele sind bereits in Rente) und der räumlichen Nähe, die auch Wochenendbesuche erlaubt, plausibel erklärt werden. Nachdem bereits heute die regionale Wertschöpfung vieler Seeanliegergemeinden von ZweitwohnungsbesitzerInnen mitbestimmt wird (u.a. auch durch Abgaben), sind damit die Perspektiven tendenziell positiv und Anpassungsstrategien nicht erforderlich (Pröbstl et al., 2012). Dies entspricht auch den einschlägigen ExpertInnenurteilen (Fleischhacker und Formayer, 2007; Chladek, 2005).

Die österreichischen Badeseen könnten aber durchaus neue TouristInnen dazugewinnen, welche bislang hauptsächlich einen Urlaub im Mittelmeerraum vorzogen. Bei weiterem Temperaturanstieg würde dieser Raum an Attraktivität verlieren; in einer Befragung gaben ca. 30 % der heimischen Strand- und BadeurlauberInnen an, im Falle extremer Hitze anstatt der Mittelmeerstrände die österreichischen Seen aufsuchen zu wollen (Fleischhacker et al., 2009).

Am Neusiedler See – als Österreichs einzigem Steppensee mit geringer durchschnittlicher Wassertiefe – kann durch erhebliche Reduktion des Wasserspiegels der Tourismus negativ betroffen sein. Hier wurden daher Anpassungsstrategien differenziert untersucht. Dabei zeigt sich, dass die Anpassungsstrategien, bezogen auf die verschiedenen touristischen Segmente und Zielgruppen, unterschiedlich ausfallen müssen. Das bedeutet, dass auch die verschiedenen Orte und Anbieter ihre Angebote spezifisch anpassen sollten (Pröbstl et al., 2007; Pröbstl, 2011).

Beim UrlauberInnensegment, für das die Ausübung wassergebundener Aktivitäten (z.B. Segeln) zu den Kernmotiven im Urlaub gehört, sind die klimawandelbedingten Wasserschwankungen nicht kompensierbar. Negative Effekte aus der Sicht dieser aktivitätsbezogenen UrlauberInnengruppe und eine Abwertung der Destination entstehen auch bei eingeschränkten Bademöglichkeiten, die nicht durch hoteleigene Pools zu ersetzen sind. Weiterhin zeigt sich – ähnlich wie beim Skisport – dass es nicht um die Aktivität per se geht, sondern um die Ausübung spezifischer landschafts- und naturbezogener Aktivitäten. Es zeigt sich, dass alternativ angebotene Aktivitäten, wie Reiten oder Golf, für die aktuelle Klientel keine Aufwertung der Urlaubsdestination oder eine Kompensation der veränderten Wasserstände bedeuten (Pröbstl et al., 2007).

[26] Für Details zu Gesundheitsfolgen durch Temperaturextreme siehe Abschnitt 4.2.3

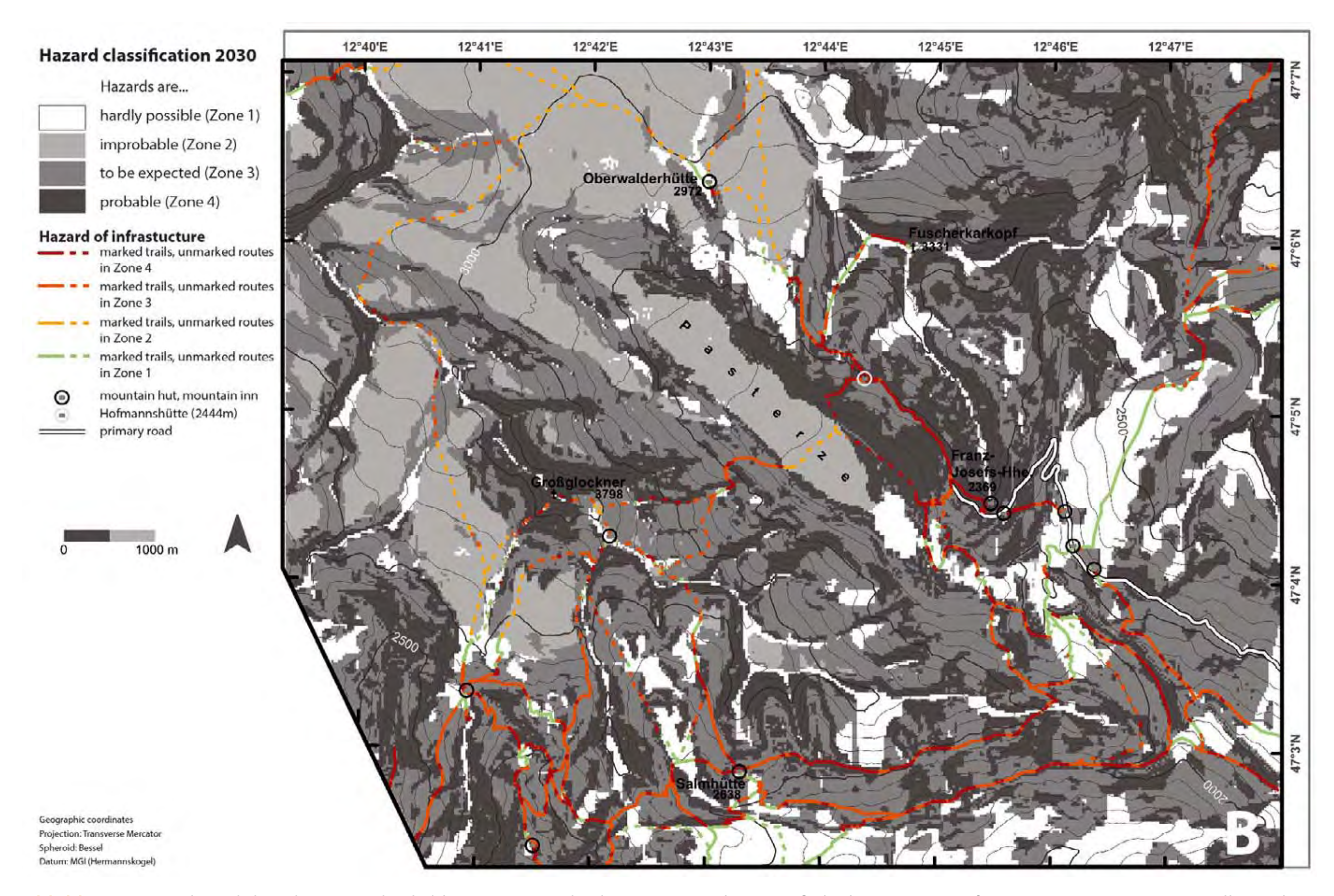


Abbildung 4.6 Vulnerabilitätskarte: Verletzlichkeit von Wegabschnitten im Gebiet Großglockner-Pasterze für ein Szenario 2030. Quelle: Lieb et al. (2010)

Figure 4.6 Vulnerability map: Vulnerability of path segments in the region Großglockner-Pasterze for a scenario 2030. Source: Lieb et al. (2010)

Betrachtet man die Ergebnisse für die UrlauberInnengruppe, die den Neusiedler See vor allem aufgrund des besonderen Natur- und Landschaftserlebnisses aufsucht, dann erweist sich diese als deutlich sensibler im Hinblick auf die erlebbaren Landschaftsveränderungen. Für dieses UrlauberInnensegment ist eine eingeschränkte Bademöglichkeit im See nicht entscheidend, solange ein ansprechendes Bild des Sees vorhanden ist. Diese im Hinblick auf die Landschaft sensible Gruppe kann trotz negativer Veränderungen dann im Gebiet gehalten werden, wenn die natur- und kulturlandschaftsbezogenen Angebote (z. B. spezielles Weinerlebnis-Angebot, Naturerlebnis) ausgebaut bzw. verstärkt werden (Pröbstl et al., 2007; Pröbstl, 2011).

Bergtourismus und alpiner Sommertourismus

Im Zusammenhang mit dem Klimawandel und dem Rückgang von Permafrost entstehen in den Hochlagen direkte Gefährdungen und Einschränkungen für den Bergtourismus (Braun, 2009; Pröbstl, 2011; Pröbstl et al., 2011b). Infolge eines ausgedehnten Rückzugs der Gletscherzungen oder eines vollständigen Abschmelzens von Gletschern führen klassische Hochtouren- und Gebirgswanderwege heute bereits teilweise über Moränenschutt und zum Teil schwer begehbare Gletscherschliffe. Entsprechende Routen werden hierdurch nicht nur insgesamt beschwerlicher, sondern auch zeitaufwendiger und für die durchschnittlichen Wanderer damit, zumindest teilweise, riskanter. Zur Reduzierung bzw. Vermeidung unverhältnismäßiger Risiken ergibt sich für verschiedene Hüttenzugänge, Höhenwanderwege und Übergänge die Notwendigkeit von Anpassung, Neubau und Instandhaltung von Weganlagen. Gemäß Untersuchungen in Österreich und der Schweiz (Pröbstl, 2011; Pröbstl et al., 2011b) ist knapp die Hälfte der BergbesucherInnen im Hinblick auf alpine Gefahren sehr unsicher. Häufig auftretende Fälle von Steinschlag führen bei dieser erholungsorientierten Zielgruppe mit höheren Ansprüchen an die Infrastruktur sehr rasch zu Abwanderungen. Dies ist umso mehr zu beachten, als es sich überwiegend um regelmäßige BesucherInnen der Bergwelt handelt und diese wichtige

touristische Zielgruppe ganzjährig zur Wertschöpfung durch Übernachtung beiträgt. Die andere Hälfte der BergtouristInnen ist deutlich mehr an naturbelassener Bergwelt interessiert und risikobewusster. Da sie mit Risiken umgehen kann, ist diese Gruppe den Bergen auch bei ungünstigen Bedingungen weiterhin „treu“. Damit kann eine Anpassung durch vermehrte Maßnahmen zur Abwehr von Naturgefahren infolge auftauenden Permafrosts und steigender Niederschlagsintensität (vgl. Band 2, Kapitel 6) vor allem dort notwendig werden, wo viele erholungsorientierte BergtouristInnen unterwegs sind. Im Rahmen des StartClim-Projekts „AlpinRiskGP“ (Lieb et al., 2010) wurde dementsprechend ein Werkzeug entwickelt, um Gefahrenstellen für sturz- und flächenhafte Abtragungsprozesse durch Gletscherschwund und auftauenden Permafrost auf alpinen (markierten) und hochalpinen (unmarkierten) Bergwegen und Routen zu identifizieren (siehe Abbildung 4.6). Damit wird die Implementierung gezielter Maßnahmen, wie das Auflassen oder die Neuanlage von Wegen oder die Einrichtung eines Wege-Informationssystems, erleichtert. Als mögliche positive Auswirkung des Klimawandels auf Outdoor-Aktivitäten, wie Wandern und Klettern, wird vom BMWFJ (2012) eine Abnahme der durchschnittlichen Niederschlagstage im Sommer erwartet. Einen überwiegend positiven Effekt des Klimawandels erhofft man sich dadurch z. B. auch für den Schutzgebietstourismus und die heimischen Luftkurorte. Der alpine Sommertourismus könnte zudem, ebenso wie die österreichischen Badeseen, von extremer Hitze im Mittelmeerraum profitieren. In der Befragung von Fleischhacker et al. (2009) gab jede/r sechste StrandurlauberIn an, zukünftig bei extremer Hitze nicht mehr auf einen Badeurlaub zu fahren, sondern stattdessen etwas anderes unternehmen zu wollen, wie z. B. einen Wanderurlaub in den Alpen.

Alpiner Wintertourismus

Für den alpinen Wintertourismus, der durch die starke Ausrichtung auf den Skisport extrem schneeabhängig ist, werden insgesamt negative Auswirkungen des Klimawandels erwartet, wobei die Betroffenheit je nach Region variiert (Band 2, Kapitel 6). Was den schneebasierten Wintertourismus betrifft, ist die Kompensation reduzierten natürlichen Schneefalls durch künstliche Beschneiung bereits heute eine verbreitete Maßnahme, um mit der jährlich variierenden Schneedecke umzugehen (OECD, 2007; Wolfsegger et al., 2008; Pröbstl, 2006; Elsasser und Bürki, 2002). Wurden in den 1970er Jahren Schneeerzeuger lediglich vereinzelt an Übungswiesen und Problemstellen im Talbereich eingesetzt (Mayer et al., 2007), waren in der Wintersaison 2010/11 bereits 67 % der österreichischen Pisten beschneibar (MANOVA, 2011). Der Ausbau der Beschneiung wird in Österreich von der öffentlichen Hand gefördert. Nach Angaben der ÖHT, welche als Kooperationsplattform zwischen Bund, Banken und Förderinstitutionen der einzelnen Bundesländer fungiert, belief sich das Investitionsvolumen für Beschneiungsanlagen 2012 auf 28,3 Mio. € (ÖHT, 2013). Als langfristige Anpassungsoption an den Klimawandel sind der Maßnahme allerdings gewisse Grenzen gesetzt (Elsasser und Bürki, 2002; OECD, 2007). Diese ergeben sich einerseits aus den Anforderungen an die Temperaturen zur Beschneiung, andererseits aus den technischen Möglichkeiten für eine Beschneiung auch bei höheren Temperaturen oder mit alternativer Technik und den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen. Ob und inwieweit die Rahmenbedingungen für die Beschneiung gegeben sind, hängt von den lokalen Verhältnissen ab. Hier ist die Höhenlage (siehe auch Band 2, Kapitel 6) nur eine wichtige Eingangsgröße. Im Hinblick auf die technische Entwicklung zeigt sich, dass bereits eine Beschneiung bei Plusgraden möglich, jedoch aufgrund der hohen Kosten nur eingeschränkt einsetzbar ist. Ob und inwieweit die Beschneiung eine Anpassungsstrategie darstellen kann, wird auch von der Umlage der Kosten abhängen und inwieweit andere touristische Leistungsträger (z. B. Hotels) an den Kosten beteiligt werden können. Ebenfalls entscheidend ist, welche Skiticket-Preissteigerungen, die mit den steigenden Betriebskosten einhergehen, von den BesucherInnen noch in Kauf genommen werden (Strasser et al., 2013). Bereits heute gehören die Kosten für den Skisport zu den wichtigsten Gründen, diesen nicht mehr auszuüben (Pröbstl und Jiricka, 2012b). Eine Befragung von 540 Wiener Ski- und SnowboardfahrerInnen ergab, dass bei der Wahl zwischen ihrer üblichen und einer schneesichereren, aber teureren Skidestination ein Großteil Kostensteigerungen von 10 % akzeptieren würden. Im Falle einer 20 %-igen Preiserhöhung würden hingegen mehr als 50 % der Befragten nicht länger die schneesichere Alternative wählen (Unbehaun et al., 2008).

Neben den vorhandenen natürlichen, technischen und wirtschaftlichen Grenzen könnte die künstliche Beschneiung zudem als eine ökologisch unerwünschte Anpassungsmaßnahme angesehen werden (IPCC, 2007; Pröbstl, 2006). Der hohe Ressourcenverbrauch (Energie, Wasser) steht konträr zu Klimaschutzzielen, birgt Konfliktpotenzial mit anderen Aktivitätsfeldern der Anpassung (insbesondere Wasserwirtschaft und Landwirtschaft) und macht die Maßnahme darüber hinaus sensibel gegenüber künftigen Energiepreissteigerungen (Steiger und Stötter, 2013). Anderseits kann Beschneiung technologisch gesehen auch mit erneuerbarer Energie betrie-

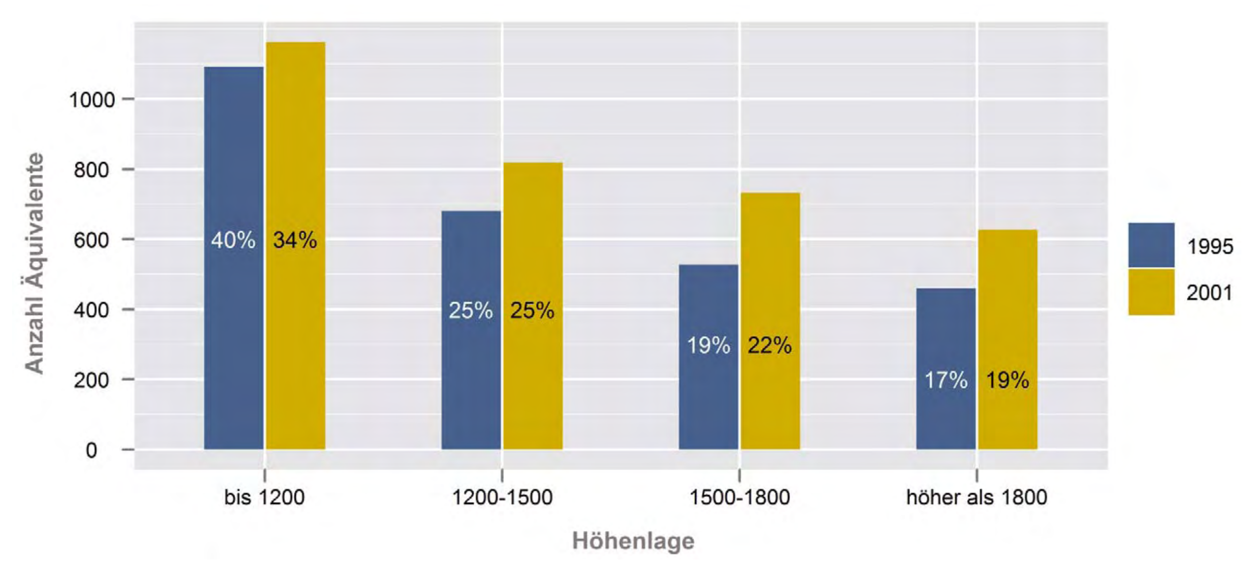


Abbildung 4.7 Verteilung der Schleppliftäquivalente auf Höhenklassen (%-Werte geben den Anteil der Höhenklasse an der Gesamtanzahl an Äquivalenten pro Jahr wieder; Rundungsdifferenzen nicht ausgeglichen). Quelle: adaptiert von Peck (2005)

Figure 4.7 Distribution of drag lift equivalents upon elevation classes (%-values represent elevation class' share on the total number of equivalents per year; not adjusted for rounding differences). Source: adapted from Peck (2005)

ben werden und technologischer Fortschritt sollte die ökologischen Nachteile zumindest mindern können (Breiling et al., 1997).

Fehlanpassungen durch kurzfristige Lösungen im Bereich der Beschneiungsanlagen könnte mittels gezielter Förderung entgegengewirkt werden. Voraussetzung hierfür sind allerdings detaillierte Untersuchungen auf lokaler Ebene zur Einschätzung der langfristigen ökonomischen Rentabilität unter breiter Berücksichtigung aller Unsicherheiten und möglicher Folgeerscheinungen (AustroClim, 2008b). Als ein adäquates Instrument als Grundlage für Förderungen und lokale Anpassungen hat sich in diesem Zusammenhang die Auditierung von Skigebieten herausgestellt.

Eine weitere Strategie stellt die Ausweitung bzw. das Ausweichen von Skigebieten in höhere Lagen und Nordhänge zur Sicherung eines durchgehenden Skibetriebs mit frühem Saisonstart und spätem Saisonende dar. Diesbezügliche Tendenzen konnten in der Vergangenheit bereits beobachtet werden. So stiegen die absoluten Liftförderkapazitäten zwischen 1995 und 2001 zwar in allen von Peck (2005) unterschiedenen Höhenklassen an, doch konnten nur in höheren Lagen auch relative Zuwächse verzeichnet werden. Während der relative Anteil an Liftförderkapazitäten in der Höhenklasse mit Talstationen über 1 800 m bzw. zwischen 1 500 m und 1 800 m von 17 auf 19 % bzw. 19 auf 22 % anstieg, stagnierte der relative Anteil in der Klasse 1 200 m bis 1 500 m bei 25 %. In tiefen Lagen mit Talstationen unter 1 200 m sank der relative Anteil sogar von 40 auf 34 % (siehe Abbildung 4.7).

Allerdings sieht sich auch diese Strategie einigen Beschränkungen gegenüber, wie etwa der Präferenz von SkifahrerInnen für sonnige Hänge, der naturräumlichen Begrenztheit vieler Skigebiete, sich weiter in die Höhe auszubreiten, dem potentiell erhöhten Lawinen- und Windrisiko sowie der Gefährdung fragiler Ökosysteme (OECD, 2007).

Ebenfalls von Skigebietsbetreibern eingesetzt wird die technologische Maßnahme der Geländebearbeitung und Pistenpräparierung, die auf die Verringerung der für den Skibetrieb erforderlichen Mindestschneehöhe abzielen. Durch Geländenivellierung kann die erforderliche Schneehöhe beispielsweise um 10 bis 20 cm verringert werden (Elsasser und Bürki, 2002; Pröbstl, 2006). Bei Totalausfällen oder signifikanten Rückgängen der Schneehöhe, wie etwa unter den extremen Wetterbedingungen im Jahr 2006/2007, sind diese Maßnahmen allerdings nutzlos. Zudem sind Geländeveränderungen vor allem in den Hochlagen aus ökologischer Sicht kritisch zu beurteilen (OECD, 2007; Pröbstl, 2006).

Gletscherskigebiete greifen im Sommer bereits zum Teil auf weiße Planen aus Polyethylen zurück, um kritische Gebiete vor Strahlung zu schützen und die Schneeschmelze einzudämmen. Laut Fischer et al. (2011) kann mittels Bedeckung des Gletschers durch Textilien die Schmelzung um 60 % reduziert werden, was einen signifikant geringeren Volumsverlust der Schneedecke verglichen mit unbedeckten Teilen des Gletschers zur Folge hat. Limitationen bestehen allerdings in Hinblick auf die Größe des Areals, das abgedeckt werden kann, und die Effektivität der Maßnahme bei weiteren Tem-

peraturanstiegen (Elsasser und Bürki, 2002). Derzeit ist diese Maßnahme eigentlich nur für die Erhaltung von Liftstützen auf Gletschern und von Verbindungsstücken in Gletscherskigebieten von Bedeutung.

Der Einsatz von Versicherungen und Wetterderivaten stellt ein weiteres Instrument dar, um sich vor Verlusten in schneearmen Wintern zu schützen. Allerdings eignet sich dieses Werkzeug nur zur Verringerung der Verluste von einzelnen schneearmen Wintersaisonen, jedoch nicht, um vor den Auswirkungen einer langfristigen Erwärmung zu schützen (OECD, 2007). Die Absicherung vor schneearmen Wintern mittels Wetterderivate spielt in Österreich derzeit nur eine untergeordnete Rolle. Unter 61 von Bank und Wiesner (2011) befragten Skiliftbetreibern fand sich lediglich ein Nutzer.

Wintertourismus in den Alpen ist stark auf den Skisport ausgerichtet und deshalb sehr schneeabhängig, wobei die Naturschneeabhängigkeit der Nächtigungszahlen rückläufig ist (Töglhofer et al., 2011, 2012). Eine mögliche Strategie für betroffene Regionen stellt daher die Verringerung der Schnee- und Skiabhängigkeit durch Angebotsergänzung bzw. -diversifizierung dar, sowohl mittels wetterabhängiger als auch mittels wetterunabhängiger Aktivitäten. Beispiele hierfür wären Erholungs- und Wellnessangebote, Kulturangebote, Sport- und Eishallen, Wanderrouten etc. Zur exakten Messung solcher Abhängigkeiten siehe Töglhofer et al. 2012.

Pröbstl et al. (2008) zeigen im Rahmen von Befragungen, dass grundsätzlich keine Kompensation von Schnee möglich ist. Jedoch kann für 20 % der UrlauberInnen (Segment der „anspruchsvollen UrlauberInnen") der Schnee durch eine gehobene Unterkunft (4/5 Stern-Hotel) und für weitere 35 % teilweise durch Zusatzangebote und ein großes Skigebiet kompensiert werden. Eine aggressive Preisstrategie der Beherbergungsunternehmen wäre – kurzfristig gesehen – auch eine Möglichkeit, die anderen preissensiblen Segmente („preisorientierte UrlauberInnen" und „infrastrukturorientierte 3-Stern UrlauberInnen") im Skigebiet zu halten. Für das vierte Segment, die „skigebietsorientierten UrlauberInnen", ist Schnee nicht zu ersetzen. Dieses Segment kann daher nicht gehalten werden.

Insgesamt soll das Ersatzprogramm an einem ersten skifreien Tag ruhig, entspannend und möglichst kostenlos sein, an einem weiteren Tag rücken aktivere Tätigkeiten in den Vordergrund. Aber auch das „ideale" Alternativprogramm bei einem 7-tägigen Urlaub kann nur für 15 % der WintersportlerInnen das Skifahren vollständig ersetzen. Im Durchschnitt sind höchstens drei Tage mit einem Ersatzprogramm überbrückbar, ohne dass die Wintersportgäste abreisen (Pröbstl et al., 2008).

Diese Ergebnisse zeigen, dass das Potenzial der Angebotsdiversifizierung begrenzt ist, denn die Skidestinationen werden nicht wegen der schneeunabhängigen Alternativangebote, sondern aufgrund der schneebasierten Aktivitäten aufgesucht (OECD, 2007; Pröbstl et al., 2008). Auch eine Untersuchung von Unbehaun et al. (2008), in der 540 aktive WintersportlerInnen aus Wien befragt wurden, gelangt zu dem Schluss, dass schneeunabhängige Substitute zwar als kurzfristige Kompensation für schlechte Schneebedingungen akzeptiert werden, aber nicht für den gesamten Winterurlaub. Schneeunabhängige Alternativgebote spielen zwar eine wichtige Rolle, da sie die Vielfalt der erhältlichen Angebote erhöhen und so das Wintergeschäft unterstützen, motivieren für sich alleine aber nicht zu einem Winterurlaub in einem Skiresort und scheinen auch nicht dieselbe umsatzgenerierende Kraft wie schneebasierte Aktivitäten zu besitzen (OECD, 2007).

Neben der Angebotsdiversifizierung innerhalb der Wintersaison besteht für derzeit stark wintersaisonorientierte Destinationen die Möglichkeit, die Neben- und Sommersaison zu stärken und sich in Richtung Ganzjahrestourismus zu entwickeln. So könnten auch etwaige positive Effekte des Klimawandels auf den alpinen Sommertourismus genutzt werden (vgl. Band 2, Kapitel 6). Allerdings zeigt die Analyse von Skigebieten, die intensiv in sommertouristische Angebote investiert haben, dass auch bei guter Auslastung im Sommer nicht die Wertschöpfung des Winters erzielt werden kann (Leupold, 2009). Dies hängt auch mit der deutlich stärkeren Konkurrenz im Sommer zusammen, insbesondere durch Destinationen im Mittelmeerraum und damit, dass wertschöpfungsintensivere Bergbahnnutzungen im Sommer, etwa Downhill-Mountainbiking, nicht so stark entwickelt sind wie der Skitourismus.

Für besonders stark gefährdete Gebiete steht in letzter Konsequenz auch die Erstellung eines integrativen Ausstiegsszenarios aus dem Schneetourismus als Strategie zur Verfügung (Freyer und Dorninger, 2009; OECD, 2007). Insbesondere am Alpenrand und in tieferen Lagen ist der Prozess der Schließung nicht mehr rentabler Anlagen kleinerer Betriebe bereits beobachtbar (Peck, 2005). Das kleine Skigebiet am Gschwender Horn in Immenstadt (Bayern) stellt ein Beispiel für einen aktiv geplanten Rückzugs vom nicht mehr rentablen Skitourismus nach einer Serie von schneearmen Wintern Anfang der 1990er Jahre dar. Die Lifteinrichtungen wurden abgetragen und die Skipisten renaturiert. Heute wird das Gebiet für Sommer- (Wandern, Mountainbiking) und Wintertourismus (Schneeschuhwandern, Schitouren) genutzt (OECD, 2007). Allerdings konnte die erfolgreiche Entwicklung nur mit Hilfe externer Stiftungsmittel eingeleitet werden (Allianz Umweltstiftung, 2005).

Eine mögliche Folge verstärkter Schließungstendenzen beinhaltet allerdings eine insgesamt abnehmende Nachfrage nach Wintersportangeboten im Zuge fehlender Gelegenheiten für die jüngere Generation, das Skifahren in näherer Umgebung zu erlernen (OcCC, 2007).

Österreichische Anpassungsstrategie

Aktivitäten, die der Klimawandelanpassung zugeordnet werden können, finden im Tourismussektor bereits statt. Allerdings handelt es sich großteils um individuelle und reaktive Maßnahmen auf bereits spürbare Auswirkungen (z.B. die Errichtung von Beschneiungsanlagen oder die tendenzielle Verlagerung von Skipisten in höhere Lagen), anstatt vernetzter und vorausschauender Aktivitäten auf zu erwartende Klimaänderungen (AustroClim, 2008a). Solche individuellen und reaktiven Maßnahmen, die für gewöhnlich auf die kurzfristige Sicherung der ökonomischen Rentabilität abzielen, bergen gegenüber vernetzten und proaktiven Maßnahmen eine erhöhte Gefahr in Bezug auf Fehlanpassung und Konflikten mit anderen Sektoren und Sparten.

Die „österreichische Strategie zur Anpassung an den Klimawandel" (BMLFUW, 2012a; 2012b) liefert einen ersten Ansatz für die Entwicklung einer ganzheitlicheren Strategie im Bereich der Klimawandelanpassung. Nachstehend werden die in der Anpassungsstrategie angeführten Handlungsempfehlungen für den Tourismus angeführt und entsprechend den oben dargestellten Ergebnissen ergänzt:

- Förderung einer nachhaltigen Entwicklung im Tourismus: z.B. Mobilität (vorrangig bezüglich Angebot und Erreichbarkeit für Gäste), Beschaffung, Energie (vorrangig für Infrastruktur: Beherbergung, Freizeiteinrichtungen);
- Entwicklung von zusätzlichen Angeboten zum schneegebundenen alpinen Winter(Ski)-Tourismus im Sinne einer Flexibilisierung und Diversifizierung der Angebote in Richtung Ganzjahrestourismus, d.h. Maßnahmen sollten Vor- und Nachsaison stärken;
- Entwicklung von wetter- und saisonunabhängigen Angeboten (unabhängige Produkte), z.B. im Bereich von Bildung, Kultur und Gesundheit;
- Betonung von regionalen Besonderheiten, wie z.B. Kulinarik, Kultur, Handwerk und Landschaft, sowie die Entwicklung von regional spezifischen Lösungen;
- Breitere terminliche Streuung bei den Ferienzeiten zur Entzerrung der zeitlich konzentrierten Tourismusströme;
- Verstärktes Bemühen um neue Zielgruppen (z.B. 50+), die allenfalls auch in der Nebensaison aktiv sein können;
- Entwicklung von innovativen neuen touristischen Produkten, bezogen auf attraktive, nachhaltige Nischenmärkte.

Im Allgemeinen empfiehlt die Österreichische Anpassungsstrategie, das Thema Klimawandel und v.a. mögliche Anpassungsoptionen verstärkt in den einzelnen Tourismusstrategien der Bundesländer zu berücksichtigen. Auf Basis der Tourismusstrategien soll dann die Entwicklung von klimaschonenden Anpassungsmaßnahmen angestrebt werden. Als erforderliche Entscheidungsgrundlage für Anpassungsmaßnahmen wird hierbei die Ausarbeitung, Bereitstellung und Verbesserung regionaler Daten etwa in Hinblick auf Klimaszenarien, Klimasensitivität und Vulnerabilität gesehen[27]. Weiters wird der Wissenstransfer als eine grundlegende Voraussetzung für die Verhinderung „spontaner Fehlanpassung" erachtet, der auch die Fähigkeit der Anpassung im Tourismussektor erhöht. Generell wird empfohlen, die Maßnahmen flexibel zu halten, um jeweils eine rasche Anpassung an sich wandelnde Bedingungen zu ermöglichen, auch angesichts teils großer prognostischer Unsicherheiten v.a. auf regionaler Ebene.

Neben einer wetterunabhängigen Angebotserweiterung sollen für jene Regionen, in denen aufgrund des Klimawandels zunehmend geringere Wertschöpfung aus dem Tourismussektor zu erwarten ist, auch Um- oder Ausstiegsszenarien in Betracht gezogen werden. Für die Forcierung anderer Wirtschaftszweige in solchen Regionen sind gemäß der Strategie vorausschauend entsprechende Strukturmaßnahmen zu setzen (BMLFUW, 2012b).

4.3.4 Forschungsbedarf

Wie im Abschnitt zum ökologischen Fußabdruck des österreichischen Tourismussektors erwähnt, fehlt es bisher an einer umfassenden und detaillierten Untersuchung zu den THG-Emissionen der Branche. Dabei wäre dies von wesentlicher Bedeutung für die Erstellung wirkungsvoller Minderungsstrategien, insbesondere um herauszufinden, in welchen Bereichen der größte Handlungsbedarf besteht. Für den alpinen Wintertourismus existieren zumindest bereits einige wenige Studien, an die eine weitere Untersuchung anknüpfen könnte. Für andere Bereiche der österreichischen Tourismuswirtschaft gibt es hin-

[27] Gössling et al. (2012), Pröbstl-Haider und Haider (2013) sowie Landauer et al. (2012 und 2013) nennen zudem auch die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit dem geplanten Verhalten bisheriger Zielgruppen der Österreich-UrlauberInnen, der Entwicklung neuer Angebote und der Ansprache möglicher neuer Zielgruppen als erforderliche Entscheidungsgrundlage zur Entwicklung adäquater Anpassungsstrategien.

gegen bislang keine nennenswerten Forschungsergebnisse auf diesem Gebiet. Eine genauere Untersuchung ist insbesondere in Hinblick auf das Mobilitätsverhalten der Gäste angeraten, um so die Entwicklung effektiver Maßnahmen zur Senkung der CO_2-Emissionen in der An- und Abreise zu erleichtern.

In Bezug auf die Anpassung wäre es vor allem interessant, zu untersuchen, welche Anpassungsmaßnahmen unter Hinblick auf die Minderung am vorteilhaftesten sind. Studien zu dieser wichtigen Fragestellung fehlen bislang in Österreich. Weiters empfiehlt sich für die Anpassung eine Überprüfung der Auswirkungen einzelner Maßnahmen sowie ein Abgleich mit neuesten Forschungsergebnissen in Hinblick auf Klimaszenarien, Klimasensitivität und Vulnerabilität. Berücksichtig man, dass solche Untersuchungen die Entscheidungsunsicherheit nicht auf null reduzieren können, kann dadurch dennoch sichergestellt werden, dass die Maßnahmen flexibel gehalten und stets umgehend an veränderte Bedingungen angepasst werden, so wie dies von der österreichischen Anpassungsstrategie gefordert wird. Regelmäßige Untersuchungen in diese Richtung, besonders auch auf regionaler Ebene, wären wünschenswert.

4.4 Literaturverzeichnis
4.4 References

Aavitsland, P., Iversen, B.G., Krogh, T., Fonahn, W., Lystad, A., 1996. Infections during the 1995 flood in Ostlandet. Prevention and incidence. Tidsskrift for den Norske lægeforening: tidsskrift for praktisk medicin, ny række 116, 2038–2043.

Ahern, M., Kovats, R.S., Wilkinson, P., Few, R., Matthies, F., 2005. Global Health Impacts of Floods: Epidemiologic Evidence. Epidemiologic Reviews 27, 36–46. doi:10.1093/epirev/mxi004

Alegre, J., Pou, L., 2006. The length of stay in the demand for tourism. Tourism Management 27, 1343–1355. doi:10.1016/j.tourman.2005.06.012

Allex, B., Liebl, U., Brandenburg, C., Gerersdorfer, T., Czachs, C., 2011. „Hot town, summer in the city" – Die Auswirkungen von Hitzetagen auf das Freizeit- und Erholungsverhalten sowie das Besichtigungsprogramm von StädtetouristInnen – dargestellt am Beispiel Wiens (Endbericht von Start-Clim2010.F in Start-Clim2010: Anpassung an den Klimawandel: Weitere Beiträge zur Erstellung einer Anpassungsstrategie für Österreich). Auftraggeber: BMLFUW, BMWF, BMWFJ, ÖBF, Wien.

Allianz Umweltstiftung, 2005. Experiment Gschwender Horn – Eine Schneise für die Natur. Allianz Journal 1, 39–40.

Alpine Perls, n.d. Die Perlen der Alpen – Nachhaltiger Urlaub im Einklang mit der Umwelt – Alpine Pearls sanfte Mobilität [WWW Document]. URL http://www.alpine-pearls.com/ (accessed 6.15.14).

Andersen, L.B., Lawlor, D.A., Cooper, A.R., Froberg, K., Anderssen, S.A., 2009. Physical fitness in relation to transport to school in adolescents: the Danish youth and sports study. Scandinavian journal of medicine & science in sports 19, 406–411. doi:10.1111/j.1600-0838.2008.00803.x

Auger, C., Latour, S., Trudel, M., Fortin, M., 2000. Post-traumatic stress disorder. After the flood in Saguenay. Can Fam Physician 46, 2420–2427.

Austrian Standards, 2003. ÖNORM H 6021. Lüftungstechnische Anlagen – Reinhaltung und Reinigung.

AustroClim, 2008a. Anpassungsstudie. Ist-Stand-Erhebung zur Anpassung an den Klimawandel in Österreich. Kurzbericht an das BMLFUW. Wien. vgl. Haas et al 2008.

AustroClim, 2008b. Identifikation von Handlungsempfehlungen zur Anpassung an den Klimawandel in Österreich. 1. Phase, 2008. Bericht im Auftrag des Lebensministeriums. Wien. Vgl Gingrich et al 2008.

Austrotherm, n.d. Erstes Passivhaus-Hallenbad mit Austrotherm XPS [WWW Document]. URL http://www.austrotherm.at/archiv/erstes-passivhaus-hallenbad-mit-austrotherm-xps.html (accessed 6.17.14).

Bank, M., Wiesner, R., 2011. Determinants of weather derivatives usage in the Austrian winter tourism industry. Tourism Management 32, 62–68. doi:10.1016/j.tourman.2009.11.005

Barnett, J., Webber, M., 2010. Accommodating Migration To Promote Adaptation To Climate Change (Background Paper to the 2010 World Development Report No. WPS5270), Policy Research Working Papers. The World Bank.

Battilani, P., Rossi, V., Giorni, P., Pietri, A., Gualla, A., van der Fels-Klerx, H.J., Booij, C.J.H., Moretti, A., Logrieco, A., Miglietta, F., Toscano, P., Miraglia, M., De Santis, B., Brera, C., 2012. Modelling, predicting and mapping the emergence of aflatoxins in cereals in the EU due to climate change (Scientific Report No. EFSA-Q-2009-00812). European Food Safety Authority, Parma, Italy.

Bayerisches Staatsministerium des Inneren, Bayerisches Staatsministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst, Bayerisches Staatsministerium der Finanzen, Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie, Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit, Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, 2011. Hinweise zur Planung und Genehmigung von Windkraftanlagen (WKA) (No. 2129.1-UG).

Becken, S., Hay, J.E., 2007. Tourism and climate change risks and opportunities. Channel View Publications, Cleveland.

BgBl, 1995. 147. Verordnung des Bundesministers für wirtschaftliche Angelegenheiten, mit der jene Solarien bezeichnet werden, deren Verwendung für sich allein die Genhmigungspflicht einer gewerblichen Betriebsanlage nicht begründet (Solarienverordnung).

BgBl, 2010. Teil II. 106. Verordnung des Bundesministers für Wirtschaft, Familie und Jugend, mit der Maßnahmen festgelegt werden, die Gewerbetreibende bei Verwendung von Solarien zur Vermeidung einer Gefährdung von Leben oder Gesundheit von Menschen zu setzen haben.

BioInitiative Working Group, 2012. BioInitiative Report: A Rationale for Biologically-based Public Exposure Standards for Electromagnetic Radiation at www.bioinitiative.org.

Biswas, R., Pal, D., Mukhopadhyay, S.P., 1999. A community based study on health impact of flood in a vulnerable district of West Bengal. Indian Journal of Public Health 43, 89–90.

BMLFUW, 2009. Auf dem Weg zu einer nationalen Anpassungsstrategie. Entwurf. Policy Paper. In Zusammenarbeit mit dem Umweltbundesamt. Wien.

BMLFUW, 2012a. Die österreichische Strategie zur Anpassung an den Klimawandel (Teil 1 – Kontext). Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
BMLFUW, 2012b. Die österreichische Strategie zur Anpassung an den Klimawandel. Handlungsempfehlungen für die Umsetzung (Teil 2 – Aktionsplan). Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
BMVIT, a. Sanfte Mobilität im Verkehr – Erfahrungen und Erfolge [WWW Document]. URL http://www.bmvit.gv.at/verkehr/gesamtverkehr/tourismus/erfolge.html (accessed 12.1.12).
BMVIT, b. Sanfte Mobilität im Tourismus – Vorhaben und Projekte [WWW Document]. URL http://www.bmvit.gv.at/verkehr/gesamtverkehr/tourismus/projekte/index.html (accessed 12.1.12).
BMWFJ, 2009. Energiemanagement-Leitfaden für Tourismusbetriebe fertiggestellt (Pressemeldung). Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, http://m.bmwfj.gv.at/Presse/Archiv/Archiv2009/Seiten/7f78a563-59ef-4601-93ce-11a72eaa83c9.aspx (accessed: 28.01.2014).
BMWFJ, 2012. Klimawandel und Tourismus in Österreich 2030. Auswirkungen, Chancen & Risiken, Optionen und Strategien. Wien. Kurzfassung. Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, Wien.
BMWFJ, 2013. Aktionsplan Tourismus 2013. Verabschiedet von Bund und Bundesländern anlässlich der Tourismuskonferenz am 25.04.2013 in Bregenz. Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, Wien.
BMWFJ, ÖBB, 2013. Bahn und Postbus: Angebote im Tourismus. Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, Wien.
BMWFJ, WKO und ÖHV, 2011. Energiemanagement in der Hotellerie und Gastronomie. Ein Leitfaden, 2. überarbeitete Auflage, Wien. http://www.oeht.at/fileadmin/user_upload/Dokumente/Downloads/Leitfaden_Energiemanagement.pdf (accessed: 28. Jänner 2014).
Braun, F., 2009. Sommer-Bergtourismus im Klimawandel: Szenarien und Handlungsbedarf am Beispiel des hochalpinen Wegenetzes (Dissertation). Universität für Bodenkultur, Wien.
Breiling, M., Charamza, P., Skage, O.R., 1997. Klimasensibilität österreichischer Bezirke mit besonderer Berücksichtigung des Wintertourismus (Langfassung Endbericht No. 18 3895/222 - I/9/95). Institut für Landschaftsplanung Alnarp, Schwedische Universität für Agrarwissenschaften. Forschungsauftrag des Österreichischen Bundesministerium für Wirtschaftliche Angelegenheiten/ Abteilung Tourismuspolitik und des Österreichischen Bundesministerium für Umwelt, Alnarp.
Bundesministerium für Gesundheit, 2013. Finanzierung des öffentlichen Gesundheitswesens [WWW Document]. GESUNDheit.GV.AT. URL https://www.gesundheit.gv.at/Portal.Node/ghp/public/content/FinanzierungGesundheitswesen.html (accessed 3.22.13).
Cervenka, J., 1976. Health aspects of Danube river floods. Annales de la Société belge de médecine tropicale 56, 217–222.
Chladek, K., 2005. Wie „klimaresistent“ ist der Badetourismus? Integra. Zeitschrift für Integrativen Tourismus und Entwicklung, Klimawandel und Tourismus 2, 20–22.
Christensen, J.H., Hewitson, B., Busuioc, A., Chen, A., Gao, X., Held, I., Jones, R., Kolli, R.K., Kwon, W.-T., Laprise, R., Magaña Rueda, V., Mearns, L., Menéndez, C.G., Räisänen, J., Rinke, A., Sarr, A., Whetton, P., 2007. Regional Climate Projections, Kap. 11.3.3.3 Temperature Variability and Extremes, in: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (Eds.), Climate Change 2007: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
Cohen, J.T., Neumann, P.J., Weinstein, M.C., 2008. Does Preventive Care Save Money? Health Economics and the Presidential Candidates. New England Journal of Medicine 358, 661–663. doi:10.1056/NEJMp0708558
De Geus, B., Van Hoof, E., Aerts, I., Meeusen, R., 2008. Cycling to work: influence on indexes of health in untrained men and women in Flanders. Coronary heart disease and quality of life. Scandinavian journal of medicine & science in sports 18, 498–510. doi:10.1111/j.1600-0838.2007.00729.x
De Hartog, J.J., Boogaard, H., Nijland, H., Hoek, G., 2010. Do the Health Benefits of Cycling Outweigh the Risks? Environmental Health Perspectives 118, 1109–1116. doi:10.1289/ehp.0901747
Dettenkofer, M., Grießhammer, R., Scherrer, M., Daschner, F., 1999. Einweg- versus Mehrweg-Patientenabdeckung im Operationssaal Ökobilanz: Vergleich von Zellstoff-Polyethylen- und Baumwoll-Mischabdeckung. Chirurg 70, 485–491. doi:10.1007/s001040050677
Dietscher, C., 2005. Das Krankenhaus als Partner für gesunde Regionen. Oekobiotikum 1/2005, 22 und 2/2005,12.
Dubois, G., Ceron, J.-P., 2006. Tourism and Climate Change: Proposals for a Research Agenda. Journal of Sustainable Tourism 14, 399–415. doi:10.2167/jost539.0
Dwyer, L., Edwards, D., Mistilis, N., Roman, C., Scott, N., 2009. Destination and enterprise management for a tourism future. Tourism Management 30, 63–74. doi:10.1016/j.tourman.2008.04.002
EEA, 2013a. Validated monitoring data and air quality maps — European Environment Agency (EEA) [WWW Document]. URL http://www.eea.europa.eu/themes/air/air-quality/map/airbase (accessed 3.26.13).
EEA, 2013b. Climate and energy country profiles – Key facts and figures for EEA member countries (EEA Technical report No. 17/2013).
Elmadfa, I., Hasenegger, V., Wagner, K., Putz, P., Weidl, N.-M., Wottawa, D., Kuen, T., Seiringer, G., Meyer, A.L., Sturtzel, B., Kiefer, I., Zilberszac, A., Sgarabottolo, V., Meidlinger, B., Rieder, A., 2012. Österreichischer Ernährungsbericht 2012, 1st ed. Wien.
Elsasser, H., Bürki, R., 2002. Climate change as a threat to tourism in the Alps. Climate Research 20, 253–257.
English, P.B., Sinclair, A.H., Ross, Z., Anderson, H., Boothe, V., Davis, C., Ebi, K., Kagey, B., Malecki, K., Shultz, R., Simms, E., 2009. Environmental Health Indicators of Climate Change for the United States: Findings from the State Environmental Health Indicator Collaborative. Environ Health Perspect 117, 1673–1681. doi:10.1289/ehp.0900708
Epstein, P.R., Ferber, D., 2011. Changing planet, changing health: how the climate crisis threatens our health and what we can do about it. University of California Press, Berkeley.
Fabre, C., Bépard, E., Nolard, N., Massot, O., Remouleur, C., Séné, E., Vincent, D., 2004. Evaluation of the health inpact of the floods in the Gard on respiratory health of disaster victims. European annals of allergy and clinical immunology 36, 330–332.
Fachverband der Seilbahnen, a. Wertschöpfung Seilbahnen Österreichs. Wien.
Fachverband der Seilbahnen, b. Ökologie und Umwelt [WWW Document]. URL http://www.seilbahnen.at/ (accessed 2.28.14).

Favero, M.S., 2001. Requiem for Reuse of Single-Use Devices in US Hospitals. Infection Control and Hospital Epidemiology 22, 539–541. doi:10.1086/501948

Fischer, A., Olefs, M., Abermann, J., 2011. Glaciers, snow and ski tourism in Austria's changing climate. Annals of Glaciology 52, 89–96. doi:http://dx.doi.org/10.3189/172756411797252338

Fleischhacker, V., Formayer, H., 2007. Die Sensitivität des Sommertourismus in Österreich auf den Klimawandel (StartClim2006. D1, Teilprojekt von StartClim2006). Institut für touristische Raumplanung - ITR, Universität für Bodenkultur, Department für Wasser – Atmosphäre – Umwelt, Institut für Meteorologie, Tulln a.d. Donau, Wien.

Fleischhacker, V., Formayer, H., Seisser, O., Wolf-Eberl, S., Kromp-Kolb, H., 2009. Auswirkungen des Klimawandels auf das künftige Reiseverhalten im österreichischen Tourismus. Am Beispiel einer repräsentativen Befragung der österreichischen Urlaubsreisenden. (Forschungsbericht im Auftrag des BMWFJ). Wien.

Formayer, H., Kromp-Kolb, H., 2009. Klimawandel und Tourismus in Oberösterreich (Forschungsbericht im Auftrag des OÖ Umweltlandesrat Rudi Anschober und der Landestourismusorganisation Oberösterreich, BOKU-Met Report 18).

Foroni, M., Salvioli, G., Rielli, R., Goldoni, C.A., Orlandi, G., Sajani, S.Z., Guerzoni, A., Maccaferri, C., Daya, G., Mussi, C., 2007. A Retrospective Study on Heat-Related Mortality in an Elderly Population During the 2003 Heat Wave in Modena, Italy: The Argento Project. The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences 62, 647–651.

Freyer, B., Dorninger, M., 2009. Bio-Berglandwirtschaft in Tirol – Beitrag zur „Klimaentlastung“ und Anpassungsstrategien (StartClim2008.D, Teilprojekt von StartClim2008). Institut für Ökologischen Landbau, Universität für Bodenkultur, Wien.

Friel, S., Bowen, K., Campbell-Lendrum, D., Frumkin, H., McMichael, A.J., Rasanathan, K., 2011. Climate change, noncommunicable diseases, and development: the relationships and common policy opportunities. Annu Rev Public Health 32, 133–147. doi:10.1146/annurev-publhealth-071910-140612

Friesenbichler, J., 2003. Energieeinsatz und CO2-Emissionen im Wintertourismus (Diplomarbeit im Rahmen des Fachhochschulstudiengangs „Infrastrukturwirtschaft“ Kapfenberg). FH Joanneum, Kapfenberg.

Frischer, T., Pullwitt, A., Kühr, J., Meinert, R., Haschke, N., Studnicka, M., Lubec, G., 1997. Aromatic hydroxylation in nasal lavage fluid following ambient ozone exposure. Free Radical Biology and Medicine 22, 201–207. doi:http://dx.doi.org/10.1016/S0891-5849(96)00292-4

Frischer, T., Studnicka, M., Gartner, C., Tauber, E., Horak, F., Veiter, A., Spengler, J., Kuhr, J., Urbanek, R., 1999. Lung function growth and ambient ozone: a three-year population study in school children. American journal of respiratory and critical care medicine 160, 390–396. doi:10.1164/ajrccm.160.2.9809075

Frischer, T., Studnicka, M., Halmerbauer, G., Horak Jr, F., Gartner, C., Tauber, E., Koller, D.Y., 2001. Ambient ozone exposure is associated with eosinophil activation in healthy children. Clinical & Experimental Allergy 31, 1213–1219. doi:10.1046/j.1365-2222.2001.01155.x

Friza, H., Lax, F., Neuberger, M., 1986. SO_2 – Ein kommunales Risiko in Wien? Untersuchungen über Beziehungen zwischen SO_2 und Mortalität an Atemwegserkrankungen. Forum Städte-Hygiene 37.

Frühwald, O., 2009. Windenergienutzung in Schigebieten – daWindSchi (No. 59/2009), Berichte aus Energie- und Umweltforschung. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie.

Gemenne, F., 2011. Climate-induced population displacements in a 4 C+ world. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 369, 182–195.

Gerersdorfer, T., Formayer, H., Moshammer, H., Frank, A., Haas, P., Leitner, B., 2006. Untersuchung zur nächtlichen Abkühlung in einem sich ändernden Klima (Endbericht zum Projekt StartClim2005.A1b, Teilprojekt von StartClim2005 „Klimawandel und Gesundheit“ No. StartClim2005.A1b). Institut für Meteorologie Universität für Bodenkultur, Medizinische Universität Wien, ZPH Institut für Umwelthygiene, Wien.

Gössling, S., Scott, D., Hall, C.M., Ceron, J.-P., Dubois, G., 2012. Consumer behaviour and demand response of tourists to climate change. Annals of Tourism Research 39, 36–58. doi:10.1016/j.annals.2011.11.002

Grabler, K., Kulnig, A., 2007. Schnee(verhältnisse) als Determinante eines nachhaltigen Wintersporttourismus. Wien.

Greil, K., 2012. Auswirkungen des Klimawandels auf den Seentourismus am Attersee aus der Sicht der Urlauber mit Zweitwohnsitz am Attersee (Masterarbeit). Universität für Bodenkultur, Wien.

Grothmann, T., Patt, A., 2005. Adaptive capacity and human cognition: the process of individual adaptation to climate change. Global Environmental Change 15, 199–213. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2005.01.002

Haas, W., Weisz, U., Pallua, I., Hutter, H.-P., Essl, F., Knoflacher, H., Formayer, H., Gerersdorfer, T., Balas, M., 2010. Handlungsempfehlungen zur Anpassung an den Klimawandel in Österreich, Aktivitätsfelder: Gesundheit, Natürliche Ökosysteme/Biodiversität und Verkehrsinfrastruktur (Im Auftrag des Klima- und Energiefonds,). AustroClim, Wien.

Haines, A., McMichael, A.J., Smith, K.R., Roberts, I., Woodcock, J., Markandya, A., Armstrong, B.G., Campbell-Lendrum, D., Dangour, A.D., Davies, M., Bruce, N., Tonne, C., Barrett, M., Wilkinson, P., 2009. Public health benefits of strategies to reduce greenhouse-gas emissions: overview and implications for policy makers. The Lancet 374, 2104–2114. doi:10.1016/S0140-6736(09)61759-1

Hajat, S., Ebi, K.L., Kovats, S., Menne, B., Edwards, S., Haines, A., 2003. The human health consequences of flooding in Europe and the implications for public health: a review of the evidence. Applied Environmental Science and Public Health 1, 13–21.

Hajat, S., O'Connor, M., Kosatsky, T., 2010. Health effects of hot weather: from awareness of risk factors to effective health protection. Lancet 375, 856–863. doi:10.1016/S0140-6736(09)61711-6

Haluza, D., Kaiser, A., Moshammer, H., Flandorfer, C., Kundi, M., Neuberger, M., 2012. Estimated health impact of a shift from light fuel to residential wood-burning in Upper Austria. Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology 22, 339–343. doi:10.1038/jes.2012.27

Horak, F., Studnicka, M., Gartner, C., Spengler, J.D., Tauber, E., Urbanek, R., Veiter, A., Frischer, T., 2002. Particulate matter and lung function growth in children: a 3-yr follow-up study in Austrian schoolchildren. European Respiratory Journal 19, 838–845. doi:10.1183/09031936.02.00512001

Huang, P., Tan, H., Liu, A., Feng, S., Chen, M., 2010. Prediction of posttraumatic stress disorder among adults in flood district. BMC Public Health 10. doi:10.1186/1471-2458-10-207

Hutter, H.-P., Moshammer, H., Wallner, P., Leitner, B., Kundi, M., 2007. Heatwaves in Vienna: effects on mortality. Wiener klinische Wochenschrift 119, 223–227. doi:10.1007/s00508-006-0742-7

Hutter, H.-P., Wallner, P., Kundi, M., Krüger, B.C., Schicker, I., Moshammer, H., 2011. Gesundheitliche Auswirkungen des Einsatzes von Biodiesel in Österreich. Atemwegs- und Lungenkrankheiten 37, 503–512. doi:10.5414/ATX01723

Ihorst, G., Frischer, T., Horak, F., Schumacher, M., Kopp, M., Forster, J., Mattes, J., Kuehr, J., 2004. Long-and medium-term ozone effects on lung growth including a broad spectrum of exposure. European Respiratory Journal 23, 292–299.

Illwerke Tourismus, 2014. Pressemitteilung Golm Winter 2014. http://www.illwerke-tourismus.at/texte (accessed 25.04.2014).

IPCC, 2007. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Jiricka, A., Wirth, V., Salak, B., Pröbstl, U., 2012. Creating a powerful niche product – ways to successful branding of „Energy-Tourism“, in: Keller, P., Laesser, C., Anderson, W. (Eds.), New Challenges for Tourism Promotion: Tackling High Competition and Multimedia Changes, International Tourism Research and Concepts. Erich Schmidt Verlag, Berlin, pp. 85–103.

Josseran, L., Fouillet, A., Caillère, N., Pascal, M., Ilèf, D., Astagneau, P., 2008. Syndromic surveillance and climate change, a possible use? Advances in Disease Surveillance 5, 106.

Kahlmeier, S., Cavill, N., Dinsdale, H., Rutter, H., Götschi, T., Foster, C., Kelly, P., Clarke, D., Oja, P., Fordham, R., Stone, D., Racioppi, F., 2011. Health economic assessment tools (HEAT) for walking and for cycling. Methodology and user guide. Economic assessment of transport infrastructure and policies. WHO World Health Organization, Regional Office for Europe.

Karrer, G., Milakovic, M., Kropf, M., Hackl, G., Essl, F., Hauser, M., Mayer, M., Blöch, C., Leitsch-Vitalos, M., Dlugosch, A., Hackl, G., Follak, S., Fertsak, S., Schwab, M., Baumgarten, A., Gansberger, M., Moosbeckhofer, R., Reiter, E., Publig, E., Moser, D., Kleinbauer, I., Dullinger, S., 2011. Ausbreitungsbiologie und Management einer extrem allergenen, eingeschleppten Pflanze – Wege und Ursachen der Ausbreitung von Ragweed (Ambrosia artemisiifolia) sowie Möglichkeiten seiner Bekämpfung (Endbericht No. 100198). Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.

Katsumata, T., Hosea, D., Wasito, E.B., Kohno, S., Hara, K., Soeparto, P., Ranuh, I.G., 1998. Cryptosporidiosis in Indonesia: a hospital-based study and a community-based survey. The American journal of tropical medicine and hygiene 59, 628–632.

Kendall P, 2010. Investing in prevention improving health and creating sustainability.The Provincial Health Officer's special report. Office of the Provincial Health Officer, Victoria, British Columbia.

Khalaj, B., Lloyd, G., Sheppeard, V., Dear, K., 2010. The health impacts of heat waves in five regions of New South Wales, Australia: a case-only analysis. Int Arch Occup Environ Health 83, 833–842. doi:10.1007/s00420-010-0534-2

Klausbruckner, B., Nentwich, H., 2004. PVC-Ausstiegsstrategie. Oekobiotikum 2/2004, 14–15.

Koehn, P.H., 2006. Globalization, migration health, and educational preparation for transnational medical encounters. Globalization and Health 2. doi:10.1186/1744-8603-2-2

Kommission für Klima und Luftqualität, 2013. Richtlinie zur Erfassung und Bewertung der Luftqualität in Kurorten. Österreichische Akademie der Wissenschaften, Wien.

Kopp, M.V., Bohnet, W., Frischer, T., Ulmer, C., Studnicka, M., Ihorst, G., Gardner, C., Forster, J., Urbanek, R., Kuehr, J., 2000. Effects of ambient ozone on lung function in children over a two-summer period. European Respiratory Journal 16, 893–900.

Kovats, S., 2006. Social and Environmental Determinants of Heat-Related Mortality: A Systematic Review. Epidemiology 17, 125.

Krüger, B.C., Schicker, I., Formayer, H., Moshammer, H., 2009. Feinstaub und Klimawandel – Gibt es Zusammenhänge in Nordostösterreich? (Endbericht zum Projekt StartClim2006.A No. 9, BOKU-Met Report). Institut für Meteorologie (BOKU-Met) Department Wasser – Atmosphäre – Umwelt Universität für Bodenkultur Wien. Auftraggeber: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft; Bundesministerium für Gesundheit, Familie und Jugend; Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung; Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit; Österreichische Hagelversicherung, Wien.

Kunii, O., Nakamura, S., Abdur, R., Wakai, S., 2002. The impact on health and risk factors of the diarrhoea epidemics in the 1998 Bangladesh floods. Public Health 116, 68–74. doi:10.1038/sj.ph.1900828

Laaidi, K., Zeghnoun, A., Dousset, B., Bretin, P., Vandentorren, S., Giraudet, E., Beaudeau, P., 2012. The impact of heat islands on mortality in Paris during the August 2003 heat wave. Environ Health Perspect 120, 254–259. doi:10.1289/ehp.1103532

Landauer, M., Haider, W., Pröbstl-Haider, U., 2013. The Influence of Culture on Climate Change Adaptation Strategies: Preferences of Cross-Country Skiers in Austria and Finland. Journal of Travel Research. doi:10.1177/0047287513481276

Landauer, M., Pröbstl, U., Haider, W., 2012. Managing cross-country skiing destinations under the conditions of climate change–Scenarios for destinations in Austria and Finland. Tourism Management 33, 741–751. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.tourman.2011.08.007

Leonardi, G., 2010. Surveillance of extreme events in the UK, in: Conference Proceedings. Presented at the Workshop on public health surveillance and climate change, French Institute for Public Health Surveillance, Saint-Maurice, France.

Leupold, A., 2009. Chancen des Sommertourismus als Alternative zum Wintertourismus in Wintersportorten am Beispiel der Region Wilder Kaiser Brixental (Diplomarbeit). Universität für Bodenkultur, Institut für Landschaftsentwicklung, Erholungs- und Naturschutzplanung, Wien.

Lieb, G.K., Kern, K., Seier, G., 2010. AlpinRiskGP – Abschätzung des derzeitigen und zukünftigen Gefährdungspotentials für Alpintouristen und Infrastruktur bedingt durch Gletscherrückgang und Permafrostveränderung im Großglockner-Pasterzengebiet (Hohe Tauern, Österreich) (Endbericht StartClim2009.F Teilprojekt von StartClim2009: Anpassung an den Klimawandel: Beiträge zur Erstellung einer Anpassungsstrategie für Österreich). Auftraggeber: BMLFUW, BMWF, BMWFJ, ÖBF, Graz.

Lischka, A-, Mad, P., Nentwich, H., Klausbruckner, B., 2011. Substituting phthalates in plastic medical devices: The Austrian experience- PVC-free Neonatal Intensive Care Unit of Children's Hospital Glanzing in Vienna. Journal Environmental Science Engineering 5: 1162-1166.

LKH Hartberg, 2010. Umwelterklärung 2010. Steiermärkische Krankenanstaltengesellschaft m.b.H., Hartberg.

MANOVA, 2011. Wirtschaftsbericht der Seilbahnen – Trends Winter 2010/2011. Manova GmbH, Wien.

Mayer, M., Steiger, R., Tragwöger, 2007. Technischer Schnee rieselt vom touristischen Machbarkeitshimmel – Schneesicherheit und technische Beschneiung in westösterreichischen Skidestina- tionen vor dem Hintergrund klimatischer Wandlungsprozesse, in: Seger, L. (Ed.), Mitteilungen Der Österreichischen Geographischen Gesellschaft. Österreichische Geographische Gesellschaft, Wien, pp. 157–180.

McKercher, B., 1998. A chaos approach to tourism. Tourism Management 20, 425–434. doi:10.1016/S0261-5177(99)00008-4

McMichael, C., Barnett, J., McMichael, A.J., 2012. An Ill Wind? Climate Change, Migration, and Health. Environmental Health Perspectives 120, 646–654. doi:10.1289/ehp.1104375

Michelozzi, P., de' Donato, F.K., Bargagli, A.M., D'Ippoliti, D., De Sario, M., Marino, C., Schifano, P., Cappai, G., Leone, M., Kirchmayer, U., Ventura, M., di Gennaro, M., Leonardi, M., Oleari, F., De Martino, A., Perucci, C.A., 2010. Surveillance of Summer Mortality and Preparedness to Reduce the Health Impact of Heat Waves in Italy. Int J Environ Res Public Health 7, 2256–2273. doi:10.3390/ijerph7052256

Mondal, N.C., Biswas, R., Manna, A., 2001. Risk factors of diarrhoea among flood victims: a controlled epidemiological study. Indian journal of public health 45, 122–127.

Morgan, M.W., Zamora, N.E., Hindmarsh, M.F., 2007. An inconvenient truth: a sustainable healthcare system requires chronic disease prevention and management transformation. Healthc Pap 7, 6–23.

Moshammer, H., 2001. PVC im Krankenhaus. Oekobiotikum 2–3/2001, 38.

Moshammer, H., 2003. Pflegen und Heilen mit Verantwortung. Oekobiotikum 3/2003, 9.

Moshammer, H., 2004. Grüne Krankenhäuser. Oekobiotikum 4/2004, 15.

Moshammer, H., 2008. Household factors influencing lung function in Austrian school children. International Journal of Environment and Health 2, 356–364. doi:10.1504/IJEnvH.2008.020928

Moshammer, H., 2010. Respiratorische Reihenuntersuchungen an Schülern: Entscheidungsgrundlagen für die kommunale Gesundheitspolitik? Atemwegs- und Lungenkrankheiten 36, 90–93.

Moshammer, H., 2012. Deliverable D4: Compilation of existing guidelines, surveillance, early warning & adaptation plans (Final document No. Project no: 2008 11 08). Climate-TRAP.

Moshammer, H., Neuberger, M., 2003. The active surface of suspended particles as a predictor of lung function and pulmonary symptoms in Austrian school children. Atmospheric Environment 37, 1737–1744. doi:10.1016/S1352-2310(03)00073-6

Moshammer, H., Hutter, H.-P., Hauck, H., Neuberger, M., 2006a. Low levels of air pollution induce changes of lung function in a panel of schoolchildren. Eur. Respir. J. 27, 1138–1143. doi:10.1183/09031936.06.00089605

Moshammer, H., Hutter, H.P., Frank, A., Gerersdorfer, T., Hlava, A., Sprinzl, G., Leitner, B., 2006b. Einflüsse der Temperatur auf Mortalität und Morbidität in Wien (StartClim2005.A1a Teilprojekt von StartClim2005 „Klimawandel und Gesundheit!"). Universität für Bodenkultur, Department für Wasser – Atmosphäre – Umwelt Institut für Meteorologie, Wien.

Moshammer, H., Hutter, H.P., Gerersdorfer, T., 2009. Einfluss von Adaptationsmaßnahmen auf das akute Sterberisiko in Wien durch Temperaturextreme (StartClim2008.A Teilprojekt von StartClim2008). Institut für Umwelthygiene Medizinische Universität Wien, ZPH, Universität für Bodenkultur,Institut für Meteorologie, Wien, Austria.

Muthers, S., Matzarakis, A., Koch, E., 2010. Summer climate and mortality in Vienna – a human-biometeorological approach of heat-related mortality during the heat waves in 2003. Wiener klinische Wochenschrift 122, 525–531. doi:10.1007/s00508-010-1424-z

Neuberger, M., Rutkowski, A., Friza, H., Haider, M., 1987. Grippe, Luftverunreinigung und Mortalität in Wien. Forum Städtehygiene 38, 7–11.

Neuberger, M., Kundi, M., Wiesenberger, H., 1997. Die Entwicklung der Linzer Luftqualität und der Lungenfuktion von Schülern, Atemswegs- und Lungenkrankheiten 23, 54–56.

Neuberger, M., Moshammer, H., Kundi, M., 2002. Declining ambient air pollution and lung function improvement in Austrian children. Atmospheric Environment 36, 1733–1736. doi:http://dx.doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00179-6

Neuberger, M., Schimek, M.G., Horak Jr, F., Moshammer, H., Kundi, M., Frischer, T., Gomiscek, B., Puxbaum, H., Hauck, H., 2004. Acute effects of particulate matter on respiratory diseases, symptoms and functions: epidemiological results of the Austrian Project on Health Effects of Particulate Matter (AUPHEP). Atmospheric Environment 38, 3971–3981. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2003.12.044

Neuberger, M., Moshammer, H., Hauck, H., Kundi, M., Rabczenko, D., Schimek, M.G., 2005. Zeitreihenstudie zur atmosphärischen Feinstaubbelastung und spezifischen Mortalität und Morbidität in Österreich, in: Österreichisches Forum Für Arbeitsmedizin. pp. 5–7.

Neuberger, M., Moshammer, H., Rabczenko, D., 2007a. Feinstaubwirkungen auf die Allgemeinbevölkerung. Atemwegs- und Lungenkrankheiten 33, 140–143.

Neuberger, M., Rabczenko, D., Moshammer, H., 2007b. Extended effects of air pollution on cardiopulmonary mortality in Vienna. Atmospheric Environment 41, 8549–8556. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.07.013

Neuberger, M., Schimek, M.G., Moshammer, H., Hauck, H., Kofler, W., 2008. Feinstaub und Spitalsaufnahmen in Graz, Linz und Wien. Atemswegs- und Lungenkrankheiten 34.

Nipitsch, B., 2010. Medizintechnik – DER Stromfresser im Krankenhaus? Pilotstudie im LKH Fürstenfeld liefert konkrete Medizintechnik-Verbrauchsdaten. G'sund online Ausgabe 65.

O'Neill, M.S., Zanobetti, A., Schwartz, J., 2003. Modifiers of the Temperature and Mortality Association in Seven US Cities. American Journal of Epidemiology 157, 1074–1082. doi:10.1093/aje/kwg096

OcCC, 2007. Klimaänderung in der Schweiz 2050. Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft. OcCC Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung, ProClim, Bern.

OECD, 2007. Climate change in the European Alps: Adapting winter tourism and natural hazards management. OECD publishing.

ÖHT, 2013. Tätigkeitsbericht 2012. Österreichische Hotel- und Tourismusbank Gesellschaft m.b.H, Wien.

OÖ Nachrichten, 2008. Hoteliers müssen die Energiekosten senken, Zeitungsartikel vom 16.01.2008. Oberösterreichische Nachrichten.

ORF, 2011. Wildkogel: Solaranlage besteht Härtetest, Artikel vom 05.01.2011.

ORF, 2013. Kritik an Airpower: 300.000 Liter Kerosin, Artikel vom 17.06.2013.

Orru, H., Andersson, C., Ebi, K.L., Langner, J., Åström, C., Forsberg, B., 2012. Impact of climate change on ozone related mortality and morbidity in Europe. European Respiratory Journal. doi:10.1183/09031936.00210411

Österreich Werbung, 2012. T-MONA Urlauber 2011/12: Ausgaben der Gäste in Österreich. Wien.
Österreich Werbung, 2014. T-MONA Urlauberbefragung [WWW Document]. URL http://www.austriatourism.com/tourismusforschung/t-mona-urlauberbefragung/ (accessed 4.25.14).
ÖSV, 2013. Skifest mit Herz ... für unsere Natur. Sustainability Report Schladming 2013, in Zusammenarbeit mit dem Land Steiermark.
Pattenden, S., Hoek, G., Braun-Fahrlander, C., Forastiere, F., Kosheleva, A., Neuberger, M., Fletcher, T., 2006. NO2 and children's respiratory symptoms in the PATY study. Occupational and Environmental Medicine 63, 828–835. doi:10.1136/oem.2006.025213
Peck, S., 2005. Die Entwicklung der Wintersportinfrastruktur in Österreich von 1995 bis 2005 – Eine Untersuchung der Aufstiegshilfen und Beschneiungsanlagen in Österreich vor dem Hintergrund der Klimavariabilität (Diplomarbeit). Technische Universität Wien, Wien.
Piguet, E., Pécoud, A., De Guchteneire, P., 2011. Migration and climate change: An overview. Refugee Survey Quarterly 30, 1–23. doi:10.1093/rsq/hdr006
Prettenthaler, F., Formayer, H. (Eds.), 2011. Tourismus im Klimawandel: Zur regionalwirtschaftlichen Bedeutung des Klimawandels für die österreichischen Tourismusgemeinden, Studien zum Klimawandel in Österreich. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien.
Prettenthaler, F., Köberl, J., Winkler, C. (Eds.), 2011. Klimarisiko Steiermark: Erste Schritte zur Anpassungsstrategie. Verlag der österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien.
Prideaux, B., Coghlan, A., McKercher, B., 2009. Identifying indicators to measure tourists' view on climate change,, in: Proceedings of the CAUTHE – 18th International Research Conference CAUTHE, 10–13 February 2009. Fremantle, WA, Australia.
Pröbstl, U., 1998. Ist umweltgerechter Skisport möglich?, in: Commission Internationale pour la Protection des Alpes (CIPRA) (Ed.), 1. Alpenreport: Daten – Fakten – Probleme – Lösungsansätze. Verlag Haupt Bern, Stuttgart, Wien, Vaduz, pp. 265–271.
Pröbstl, U., 2006. Kunstschnee und Umwelt – Entwicklung und Auswirkungen der technischen Beschneiung. Haupt Verlag, Bern Stuttgart Wien.
Pröbstl, U., 2011. Natur und Klimawandel, Herausforderungen durch den Klimawandel für naturtouristische Angebote. Natur und Landschaft 86, 534–535.
Pröbstl, U., Jiricka, A., 2012a. Carbon Foot Print Skilifte Lech. Modellprojekt in Zusammenarbeit mit dem OITAF Umweltausschuss. ISR Internationale Seilbahn-Rundschau 4, 24–25.
Pröbstl, U., Jiricka, A., 2012b. Sommer am Berg – mit oder ohne erneuerbare Energieträger? ISR Internationale Seilbahn Rundschau 5, 23–25.
Pröbstl, U., Müller, F., 2012. Hotel certification and its relevance for sustainable development: examples from the European Alps, in: Pineda, F.D., Brebbia, C.A. (Eds.), Sustainable Tourism, WIT Transactions on Ecology and the Environment. WIT Press, Southampton, pp. 3–15.
Pröbstl, U., Jiricka, A., Haider, W., Schauppenlehner, T., 2007. StartClim2006D3: See-Vision Einfluss von klimawandelbedingten Wasserschwankungen im Neusiedler See auf die Wahrnehmung und das Verhalten von Besucherinnen und Besuchern, StartClim2006 Klimawandel und Gesundheit, Tourismus, Energie, Endbericht.
Pröbstl, U., Dallhammer, E., Formayer, H., Grabler, K., Haas, P., Jesch, M., Krajasits, C., Kulnig, A., Prutsch, A., Stanzer, G., 2008. Strategien zur nachhaltigen Raumentwicklung von Tourismusregionen unter dem Einfluss der globalen Erwärmung am Beispiel der Wintersportregion um Schladming (Endbericht des Projektes Stratege, Projektförderung im Rahmen von proVISION des Bundesministeriums für Wissenschaft und Forschung 2005–2007). Wien.
Pröbstl, U., Jiricka, A., Hindinger, F., 2011a. Renewable energy in winter sports destinations – desired, ignored or rejected, in: Stötter, J., Borsdorf, A., Veulliet, E. (Eds.), Managing Alpine Future II – Proceedings of the Innsbruck Conference November 21–23, 2011. ÖAW, Innsbruck, p. 34.
Pröbstl, U., Haider, W., Hägeli, P., Rupf, R., 2011b. Klimawandel und Bergtourismus, in: Bieger, T., Beritelli, P., Laesser, C. (Eds.), Wandel Als Chance Für Den Alpinen Tourismus, Schweizer Jahrbuch Für Den Tourismus 2011. St. Gallen, pp. 83–92.
Pröbstl, U., Greil, K., Wirth, V., 2012. Summer tourism and climate change in the alpine region: Is a Viagra-effect likely to happen? – An overview on research findings in Austria, in: Kozsk, M., Kozsk, N. (Eds.), 6th World Conference for Graduate Research in Tourism, Hospitality and Leisure. Proceedings Book. Presented at the 6th World Conference for Graduate Research in Tourism, Hospitality and Leisure, Fethiye, 24.–29. April 2012.
Pröbstl-Haider, U., Haider, W., 2013. Tools for measuring the intention for adapting to climate change by winter tourists: some thoughts on consumer behavior research and an empirical example. Tourism Review 68, 44–55. doi:10.1108/TR-04-2013-0015
Pucher, J., Buehler, R., 2008. Making cycling irresistible: lessons from the Netherlands, Denmark and Germany. Transport Reviews 28, 495–528. doi:10.1080/01441640701806612
Reacher, M., McKenzie, K., Lane, C., Nichols, T., Kedge, I., Iversen, A., Hepple, P., Walter, T., Laxton, C., Simpson, J., 2004. Health impacts of flooding in Lewes: a comparison of reported gastrointestinal and other illness and mental health in flooded and non-flooded households. Communicable Disease and Public Health 7, 39–46.
Reid, C.E., O'Neill, M.S., Gronlund, C.J., Brines, S.J., Brown, D.G., Diez-Roux, A.V., Schwartz, J., 2009. Mapping community determinants of heat vulnerability. Environmental Health Perspectives 117. doi:10.1289/ehp.0900683
Renoldner, K., 2009. A doctor's view on CO2: a physician's experience to reduce greenhouse gas emissions. Medicine Conflict and Survival 25, 166–169. doi:10.1080/13623690902943420
Restrepo, C.E., 2011. The Health Practitioner's Guide to Climate Change: Diagnosis and Cure–Edited by Jenny Griffiths, Mala Rao, Fiona Adshead and Allison Thorpe, in: Natural Resources Forum. pp. 246–248. doi:10.1111/j.1477-8947.2011.01393.x
Rieder, A., 2008. Prinzip der Prävention: Screening, Sekundärprävention und Rehabilitation anhand von Herz-Kreislauferkrankungen, in: Wittmann, K.J. (Ed.), Der Mensch in Umwelt, Familie Und Gesellschaft., Skriptum Zum MCW Block 6. 6. Aktualisierte Auflage. Facultas Wien.
Roser, D., Seidel, C., 2013. Ethik des Klimawandels. Eine Einführung. WBG, Darmstadt.
Samoli, E., Peng, R., Ramsay, T., Pipikou, M., Touloumi, G., Dominici, F., Burnett, R., Cohen, A., Krewski, D., Samet, J., Katsouyanni, K., 2008. Acute effects of ambient particulate matter on mortality in Europe and North America: results from the APHENA study. Environmental health perspectives 116. doi:10.1289/ehp.11345

Scharf, B., Pitha, U., Neidhard, S., Florineth, F., 2010. Grüne Gleise für Graz., in: „Stadtgrün 2025 – Herausforderungen Und Chancen" – Zusammenfassung Der Vorträge / Poster Und Weitere Informationen – [Poster]. Presented at the 2. Forschungsforum Landschaft 2010, Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V., Veitshöchheim.

Scharlach, M., Diercke, M., Dreesman, J., Jahn, N., Krieck, M., Beyrer, K., Claußen, K., Pulz, M., Floride, R., 2013. Epidemiological analysis of a cluster within the outbreak of Shiga toxin-producing Escherichia coli serotype O104:H4 in Northern Germany, 2011. International Journal of Hygiene and Environmental Health 216, 341–345. doi:10.1016/j.ijheh.2012.10.001

Scheuriach, D., 2011. Das erste Passivhaus-Schwimmbad. Fachmagazin für energieeffizientes Bauen und Sanieren 1, 20–25.

Schmidt, A.J., 2013. Optimierung des Beschaffungsprozesses durch Einkaufsgenossenschaften. Vortrag beim 22. Dosch-Symposium, 3.–5. Juni 2013, Velden.

Schmittenhöhenbahn AG, 2012. Mit der Natur auf Du und Du. Ökobericht der Schmittenhöhenbahn AG. Schmittenhöhenbahn AG, Zell am See - Kaprun.

Scott, D., Jones, B., 2006. Climate Change and Seasonality in Canadian Outdoor Recreation and Tourism (Executive Summary, Report prepared for the Government of Canada Climate Change Action Fund). University of Waterloo, Waterloo, Ontario.

Semenza, J.C., Menne, B., 2009. Climate change and infectious diseases in Europe. The Lancet infectious diseases 9, 365–375. doi:10.1016/S1473-3099(09)70104-5

Semenza, J.C., Rubin, C.H., Falter, K.H., Selanikio, J.D., Flanders, W.D., Howe, H.L., Wilhelm, J.L., 1996. Heat-related deaths during the July 1995 heat wave in Chicago. New England Journal of Medicine 335, 84–90. doi:10.1056/NEJM199607113350203

Semenza, J.C., Suk, J.E., Estevez, V., Ebi, K.L., Lindgren, E., 2012. Mapping Climate Change Vulnerabilities to Infectious Diseases in Europe. Environ Health Perspect 120, 385–392. doi:10.1289/ehp.1103805

Sherwood, S.C., Huber, M., 2010. An adaptability limit to climate change due to heat stress. Proceedings of the National Academy of Sciences 107, 9552–9555. doi:10.1073/pnas.0913352107

Siddique, A.K., Baqui, A.H., Eusof, A., Zaman, K., 1991. 1988 floods in Bangladesh: pattern of illness and causes of death. Journal of Diarrhoeal Diseases Research 9, 310–314.

Simic, S., Schmalwieser, A.W., Moshammer, H., 2008. Gesundheitsrisiken für die Österreichische Bevölkerung durch die Abnahme des stratosphärischen Ozons (Endbericht zum Projekt StartClim2007.B No. BOKU-Met Report 15). Institut für Meteorologie (BOKU-Met) Department Wasser – Atmosphäre – Umwelt Universität für Bodenkultur Wien, Auftraggeber: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft; Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung; Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit; Österreichische Hagelversicherung; Verbund AHP; Bundesministerium für Gesundheit, Familie und Jugend, Wien.

Sloan, P., Simons-Kaufmann, C., Legrand, W. (Eds.), 2012. Sustainable Hospitality and Tourism as Motors for Development. Routledge, London, New York.

Soon, J.M., Seaman, P., Baines, R.N., 2013. Escherichia coli O104:H4 outbreak from sprouted seeds. International Journal of Hygiene and Environmental Health 216, 346–354. doi:10.1016/j.ijheh.2012.07.005

Stafoggia, M., Forastiere, F., Agostini, D., Biggeri, A., Bisanti, L., Cadum, E., Caranci, N., de' Donato, F., De Lisio, S., De Maria, M., Michelozzi, P., Miglio, R., Pandolfi, P., Picciotto, S., Rognoni, M., Russo, A., Scarnato, C., Perucci, C.A., 2006. Vulnerability to heat-related mortality: a multicity, population-based, case-crossover analysis. Epidemiology 17, 315–323. doi:10.1097/01.ede.0000208477.36665.34

Stafoggia, M., Forastiere, F., Agostini, D., Caranci, N., De'Donato, F., Demaria, M., Michelozzi, P., Miglio, R., Rognoni, M., Russo, A., 2008. Factors affecting in-hospital heat-related mortality: a multi-city case-crossover analysis. Journal of epidemiology and community health 62, 209–215. doi:10.1136/jech.2007.060715

Stafoggia, M., Forastiere, F., Michelozzi, P., Perucci, C.A., 2009. Summer temperature-related mortality: effect modification by previous winter mortality. Epidemiology 20, 575–583.

Stanfield, J.R., 1983. Toward an Ecological Economics. International Journal of Social Economics 10, 27–37.

Statistik Austria, 2004. Gebäude- und Wohnungszählung 2001 – Hauptergebnisse Österreich. Wien.

Statistik Austria, 2011. Urlaubs- und Geschäftsreisen 2010 – Ergebnisse aus den vierteljährlichen Befragungen. Wien.

Statistik Austria, 2012. Tourismus-Satellitenkonto [WWW Document]. URL http://www.statistik.gv.at/web_de/statistiken/tourismus/tourismus-satellitenkonto/index.html (accessed 6.17.14).

Statistik Austria, 2012. Gesundheitsausgaben in Österreich laut System of Health Accounts (OECD) 1990–2011 in Mio. EUR [WWW Document]. Statistiken – Gesundheit – Gesundheitsausgaben. URL http://www.statistik.at/web_de/statistiken/gesundheit/gesundheitsausgaben/019701.html (accessed 12.11.12).

Statistik Austria, 2013. Tourismusstatistik [WWW Document]. URL http://www.statistik.at/web_de/statistiken/tourismus/ (accessed 12.2.13).

Statistik Austria, WKÖ, BMWFJ, ÖHT, 2013. Tourismus in Österreich 2012. Ein Überblick in Zahlen. Statistik Austria, Wirtschaftskammer Österreich, Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, Österr. Hotel- und Tourismusbank, Wien.

Stehr, N., von Storch, H., 1995. The social construct of climate and climate change. Climate Research 05, 99–105. doi:10.3354/cr005099

Steiger, R., Stötter, J., 2013. Climate Change Impact Assessment of Ski Tourism in Tyrol. Tourism Geographies 1–24. doi:10.1080/14616688.2012.762539

Steiner, T., 2010. Nachhaltigkeit im alpinen Skitourismus – Ein Vergleich von ausgewählten Skigebieten in Kärnten (Masterarbeit). Karl-Franzens Universität Graz, Institut fpr Geographie und Raumforschung, Graz.

Strasser, U., Prettenthaler, F., Gobiet, A., Stötter, J., Kleindienst, K., Steininger, K., Damm, A., Hanzer, F., Köberl, J., Marke, T., Ragg, H., Steiger, R., Wilcke, R., Töglhofer, C., Lang, T., Osebik, D., Zimmermann, F.M., Leuprecht, A., 2013. Auswirkungen des Klimawandels auf die Schneedecke und den Skitourismus in Tirol und der Steiermark: Ergebnisse der ACRP-Projekte CC-Snow und CC-Snow II, in: Tagungsband 14. Klimatag. Presented at the 14. Österreichischer Klimatag, Climate Change Centre Austria CCCA Klima- und Energiefonds,Universität für Bodenkultur Wien, Wien, pp. 34–37.

Sur, D., Dutta, P., Nair, G.B., Bhattacharya, S.K., 2000. Severe cholera outbreak following floods in a northern district of West Bengal. Indian Journal of Medical Research 112, 178–182.

Tagaris, E., Liao, K.-J., DeLucia, A.J., Deck, L., Amar, P., Russell, A.G., 2009. Potential impact of climate change on air pollution-related human health effects. Environmental science & technology 43, 4979–4988. doi:10.1021/es803650w

Tapsell, S.M., Tunstall, S.M., 2008. „I wish I'd never heard of Banbury“: The relationship between „place“and the health impacts from flooding. Health & Place 14, 133–154. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.healthplace.2007.05.006

Telles, S., Singh, N., Joshi, M., 2009. Risk of posttraumatic stress disorder and depression in survivors of the floods in Bihar, India. Indian Journal of Medical Sciences 63, 330–334. doi:10.4103/0019-5359.55883

Theuretzbacher, F., Bauer, A., Amon, B., Amon, T., 2012. Biogas production using strong lignified hay–optimization of the steam explosion pretreatment, in: CIGR, International Conference of Agricultural Engineering CIGR-AgEng2012 Proceedings. Valencia, Spain.

Töglhofer, C., Eigner, F., Prettenthaler, F., 2011. Impacts of snow conditions on tourism demand in Austrian ski areas. Climate Research 46, 1–14. doi:10.3354/cr00939

Töglhofer, C., Mestel, R., Prettenthaler, F., 2012. Weather Value at Risk: On the Measurement of Noncatastrophic Weather Risk. Weather, Climate, and Society 4, 190–199. doi:10.1175/WCAS-D-11-00062.1

TU Wien, 2013. Tourismusmobilität 2030, Kurzfassung. Studie im Auftrag des BMWFJ. TU Wien, Department für Raumplanung, Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, Wien.

Tyrvainen, L., Järviluoma, J., Nikkola, K., Silvennoinen, H., 2012. Windpower in a nature-based tourism area – green energy or landscape disturbance?, in: Fredman, P., Stenseke, M., Liljendahl, H., Mossing, A., Laven, D. (Eds.), Proceedings. Outdoor Recreation in Change – Current Knowledge and Future Challenges, 6. MMV, Stockholm, August 21–24, 2014. Stockholm, Sweden, pp. 312–313.

Umweltbundesamt, 2009. Erreichbarkeit alpiner Tourismusstandorte mit dem öffentlichen Verkehr (Nationale Studie Österreich No. Rep0217). Umweltbundesamt, Wien.

Umweltbundesamt (Ed.), 2010. Diverse Kurzfassungen zu Prozessionsspinnerraupen. Presented at the Internationales UBA/BMU -Fachgespräch, 09. und 10. November 2009, Umweltbundesamt, Berlin-Dahlem, Deutschland.

Unbehaun, W., Pröbstl, U., Haider, W., 2008. Trends in winter sport tourism: challenges for the future. Tourism Review 63, 36–47. doi:10.1108/16605370810861035

UNWTO, UNEP, WMO, 2008. Climate change and tourism: responding to global challenges. World Tourism Organization, United Nations Environment Programme, World Meteorological Organization, Madrid; Paris.

Veit, H., 2002. Die Alpen. Geoökologie und Landschaftsentwicklung. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart (Hohenheim).

Wade, T.J., Sandhu, S.K., Levy, D., Lee, S., LeChevallier, M.W., Katz, L., Colford, J.M., 2004. Did a severe flood in the Midwest cause an increase in the incidence of gastrointestinal symptoms? American Journal of Epidemiology 159, 398–405. doi:10.1093/aje/kwh050

Wallner, P., 2001. Sanfte Mobilität für Krankenhäuser. Oekobiotikum 1/2001, 15.

Waring, S.C., Reynolds, K.M., D'Souza, G., Arafat, R.R., 2002. Rapid assessment of household needs in the Houston area after Tropical Storm Allison. Disaster management & response: DMR: an official publication of the Emergency Nurses Association 3–9.

Weisz, U., Haas, W., Pelikan, J.M., Schmied, H., 2011. Sustainable Hospitals: A Socio-Ecological Approach. GAIA – Ecological Perspectives for Science and Society 20, 191–198.

WHO, 2012. Health in the green economy. Co-benefits to health of climate change mitigation. Health Care Facilites: Preliminary findings – initial review. World Health Organization, Geneva, Switzerland.

WHO, 2005. Air quality guidelines – global update 2005. World Health Organization, Geneva, Switzerland.

Wittels, P., Neuberger, M., Hauck, H., Kanduth, B., 1997. Reduktion von Lungenfunktionsparametern nach körperlicher Belastung in den österreichischen Alpen bei Ozonkonzentrationen unterhalb der gesetzlichen Vorwarnstufe. Wiener klinische Wochenschrift 109, 321–326.

WKO, 2011. Tourismus in Zahlen – Österreichische und internationale Tourismus- und Wirtschaftsdaten. 47. Ausgabe. Wirtschaftskammer Österreich, Wien.

Wolfsegger, C., Gössling, S., Scott, D., 2008. Climate change risk appraisal in the Austrian ski industry. Tourism Review International 12, 13–23.

Woodruff, B.A., Toole, M.J., Rodrique, D.C., Brink, E.W., Mahgoub, E.S., Ahmed, M.M., Babikar, A., 1990. Disease surveillance and control after a flood: Khartoum, Sudan, 1988. Disasters 14, 151–163. doi:10.1111/j.1467-7717.1990.tb01056.x

Zegg, R., Küng, T., Grossrieder, R., 2010. Energiemanagement Bergbahnen. Seilbahnen Schweiz (Hrsg.), Schweiz.

Band 3 Kapitel 5: Produktion und Gebäude
Volume 3 Chapter 5: Production and Buildings

Koordinierende Leitautoren
Hans Schnitzer, Wolfgang Streicher

Leitautor
Karl W. Steininger

Beiträge von
Tania Berger, Christoph Brunner, Alexander Passer, Jürgen Schneider, Michaela Titz, Heidi Trimmel, Andreas Türk

Für den Begutachtungsprozess
Brigitte Bach

Inhalt

ZUSAMMENFASSUNG

Produktion

Nahezu ein Drittel des globalen Energieeinsatzes und beinahe 40 % der weltweiten CO_2-Emissionen können industriellen Tätigkeiten zugerechnet werden. Der Großteil dieser Emissionen kommt aus dem Bereich der Herstellung von Grundmaterialien wie Chemikalien, Eisen / Stahl, Zement, Zellstoff / Papier und Aluminium.

Der Hauptenergieträger für den produzierenden Bereich ist Gas, die elektrische Energie liegt in der selben Größenordnung. Die Einsatzmengen an Kohle und Öl haben sich in den letzten Jahre kaum geändert. Das liegt daran, dass die Kohle zu einem großen Teil aus prozesstechnischen Gründen eingestetzt wird und nur zu einem geringen Teil als Energieträger. Der Einsatz von Öl erfolgt dagegen hauptsächlich in Motoren (Diesel) und ist hier kaum ersetzbar.

Die Treibhausgas (THG)-Emissionen – ausgedrückt als CO_2-Äquivalent – aus dem Sektor „Industrie und produzierendes Gewerbe" sind zwischen 1990 und 2010 um 16,2 % (+3,4 Mt) angestiegen.

Die Pläne der Europäischen Union, ein kohlenstoffarmes Wirtschaftssystem in Europa aufzubauen, stellen den produzierenden Bereich vor eine große Herausforderung. Zentraler Ansatz hierbei muss eine Reduktion des Endenergieeinsatzes sein, der in der geforderten Größenordnung nicht durch kontinuierliche Verbesserungen und eine Anwendung des „Standes der Technik" erreicht werden kann, sondern radikal neue Technologien erfordert; hierzu sind geeignete Forschungs- und Entwicklungs-Programme erforderlich. Es ist abzuwarten, wieweit eine neue Gesetzgebung zur Durchsetzung einer Energieeffizienz erfolgreich sein wird. Das bestehende System des Emissionshandels für CO_2 ist mäßig erfolgreich.

Zudem ist ein verstärkter Einsatz erneuerbarer Energien gefordert um einen großer Teil des verbleibenden Energiebedarfs abdecken zu können. Mittelfristig kann auch ein Teil des technologisch erforderlichen Kohlenstoffes aus biogenen Quellen abgedeckt werden. Auch hier besteht ein großer Forschungsbedarf.

Gebäude

Der Gebäude- und Wohnungsbestand in Österreich wächst seit 1961 linear und hat sich von 2,2 auf 4,4 Mio. Wohnungen im Jahr 2011 verdoppelt. Der Sektor „Raumwärme und sonstiger Kleinverbrauch" trägt mit 28 % zum Endenergiebedarf und mit 14 % zu den THG-Emissionen bei. Der Energiebedarf für diesen Sektor ist seit ca. 1996 konstant und der CO_2-Ausstoß um ca. 18 % gesunken. Bedingt durch den Klimawandel wird es zu einer Reduktion des Heizwärmebedarfs um 20 % und einer Zunahme des Kühlbedarfs bis 2050 kommen. Dennoch wird der Heizwärmebedarf für die meisten Gebäude den Kühlbedarf übersteigen.

Bei Neubauten konnte der Heizenergiebedarf seit 1975 aufgrund des technologischen Fortschritts stark gesenkt werden. Gleichzeitig wurden die energetischen Anforderungen durch Bauordnungen und Wohnbauförderungen erhöht.

Dies wird nach Europäischer Gebäuderichtlinie (Richtlinie 2010/31/EU, Neufassung 2010) in Richtung „nearly zero energy buildings" weiter forciert werden. Zur Hauptreduktion des Energiebedarfs wird die hochwertige thermische Sanierung des Gebäudebestands betragen.

Die weitere Senkung der THG-Emissionen gelingt durch die verstärkte Einbindung der Nutzung erneuerbarer Energieträger (EET). Die fällt umso leichter, je geringer der Energiebedarf des Gebäudes ist. Solarthermie und Photovoltaik werden zunehmend auf freien und richtig ausgerichteten Gebäudeflächen genutzt werden. Wärmepumpen werden in Richtung kleiner Baugrößen weiter forciert werden. Biomasse wird aufgrund beschränkter Verfügbarkeit eher im Bereich Industrie und Mobilität ausgebaut werden, Nahwärmenetze werden aufgrund des verringerten Energiebedarfs der Gebäude eine kleinere Rolle spielen.

Beim Haushaltsstromverbrauch wird es durch effizientere Technologien und „Smart Grid"-Anwendungen zu Einsparungen kommen, jedoch wird die weitere Verbreitung neuer stromkonsumierender Anwendungsbereiche bei gleichbleibendem niedrigen Niveau der Strompreise zu einem Gesamtanstieg führen.

Unter diesen Randbedingungen kann bis 2050 durch EET etwa 90 % des Wärmebedarfs im Gebäudebereich abgedeckt werden.

SUMMARY

Industrial Sector

Almost one-third of global energy demand and about 40 % of greenhouse gas emissions can be attributed to the process industry. The majority of emissions are caused by the production of basic materials such as steel, cement, pulp & paper and aluminium.

In Austria, industrial sector energy use dropped from one-third of total national demand to one-fourth between 1970 and 1990, but is currently on an upward trend. In 2010, the industrial sector accounted for 28.4 % of total national energy demand. The main energy carrier for the sector is natural gas while electricity is in the same order of magnitude. The amounts of coal and oil have stabilized at a low level. Coal is

mainly used due to process requirements, and is only marginally used as an energy carrier. Oil is mainly used in combustion engines (e. g., diesel motors) for which there is no easy substitute. Greenhouse gas emissions from industry increased by 16.2 % (+3.4 Mt CO_2-eq.) between 1990 and 2010.

The European Union's goals to develop a low-carbon economic system pose a great challenge for the industrial sector. In order to meet these goals, a significant reduction in final energy use is required. However, the required reductions cannot be achieved by relying on continuous improvements or application of „Best Available Technologies", rather radical new technologies are required as well as the corresponding funding for research and development. It remains to be seen how effective the presently planned legislation regarding energy efficiency improvements can contribute to this process.

In any case, an increased share of renewable energies is necessary. In the medium term, carbon requirements for industrial processes could be met using biogenic sources, however significant further research is still required.

Building Sector

The „space heating and other demand" sector accounts for 28 % of Austrian final energy demand and 14 % of greenhouse gas emissions. While the number of dwellings has steadily increased since 1961 from 2.2 Mio. to 4.4 Mio. in 2011, the final energy demand has remained constant since 1996 and greenhouse gas emissions have been reduced by about 18 %. Due to climate change, the space heating demand is projected to decrease 20 % by 2050 whereas cooling energy demand will increase. Nevertheless, space heating will be the dominant energy user in most buildings.

For new buildings, the space heating energy demand was strongly reduced due to technological improvements, but also the concurrent passing of new building codes and establishment of new subsidy schemes. Further reductions in demand will occur due to the „nearly zero energy" buildings requirements of the European Building Directive (Directive 2010/31/EU, recast 2010). The majority of energy reductions are achieved by high-quality renovations and retrofitting.

Further greenhouse gas emissions reductions can be achieved by the increased deployment of renewable energy technologies. Solar thermal and photovoltaics collectors can be mounted on open and favourably oriented building surfaces. Small heat pumps should be developed and widely distributed. Due to limited availability, biomass will most likely be used for industry and mobility rather than in buildings. District heating networks will become less important due to lower energy demand of the buildings.

Household electricity demand will decrease due to efficient technologies and smart grid applications but increase due to new electric applications. On a whole, the total electricity demand will moderately increase.

Under such boundary conditions, 90 % of space heating energy demand in buildings could be covered by renewable energy technologies in 2050.

KERNAUSSAGEN

Produktion

- Nachdem es zwischen 1970 und 1995 keinen Anstieg des Energieverbrauchs im Bereich Produktion gegeben hat, kam es danach zu einer starken Steigerung (sicher, da Vergangenheit). Von einer weiteren Steigerung des Energieeinsatzes kann ausgegangen werden, wenn nicht gezielt Maßnahmen gesetzt werden (wahrscheinlich, hängt von der allgemeinen Wirtschaftsentwicklung in Europa ab).
- Die Umstellung von Kohle und Öl auf Erdgas ist weitgehend abgeschlossen; der verbleibende Einsatz an Kohle ist großteils prozessbedingt. Diese Umstellung erfolgte hauptsächlich aus ökonomischen Gründen, hatte aber auch eine positive Wirkung auf die Emissionen von Treibhausgasen. Verbunden hiermit ist jedoch eine starke Abhängigkeit von wenigen Lieferanten bzw. Lieferländern (sicher, da Vergangenheit).
- Viele Maßnahmen zur Energieeinsparung in Produktionsbetrieben zielen hauptsächlich auf die Reduktion des Brennstoffeinsatzes. In vielen Fällen führt dies zu einer Erhöhung des Strombedarfs. Die Emissionen der Stromherstellung werden aber nicht dem produzierenden Bereich zugerechnet. Gleichzeitig führt die Einführung der energieeffizienten Eigenstromherstellung zu einem verstärkten Gaseinsatz und damit zu erhöhten Emissionen des produzierenden Bereichs, obwohl national gesehen der Wirkungsgrad des Energiesystems steigt (sehr wahrscheinlich).
- Erneuerbare Energieträger sind – mit Ausnahme der Zellstoffindustrie – gering verbreitet (sicher, da Faktum).
- Der Energiebedarf für Raumwärme ist im produzierenden Bereich relativ groß und wird derzeit weitgehend durch fossile Energieträger gedeckt; energieeffizientes Bauen und erneuerbare Energien im Bereich der Produktionshallen und Lager sind gering verbreitet; effiziente Bautechniken im Bereich der Industriehallen und gewerblich genutzten Gebäuden kann wesentlich zur Verminderung des Energieeinsatzes im Bereich Produktion beitragen (sehr wahrscheinlich).

- Das Potenzial für industrielle Wärme-Kraft-Kopplungen und ORC-Anlagen ist nicht ausgeschöpft, deren verbreiterter Einsatz kann ebenfalls zu einer Emissionsminderung beitragen (sehr wahrscheinlich).
- Maßnahmen im Bereich der Energiebereitstellung überwiegen gegenüber Maßnahmen bei den Energiedienstleistungen nach wie vor (sicher, da Faktum).
- Langfristig sind Verbesserungen an bestehenden Apparaten und Maschinen nicht ausreichend, um die energiepolitischen Ziele zu erreichen; Neuentwicklungen sind daher notwendig (wahrscheinlich).
- Von keiner der untersuchten Branchen gibt es Strategien zur Adaption an eine Klimaänderung, die Produktionsverfahren betreffend (sehr wahrscheinlich richtig).
- Viele der alten Industriebetriebe in Österreich stehen an Standorten mit einer möglichen Nutzung von Wasserkraft in kleinem Maßstab. Das Potenzial einer Revitalisierung dieser Anlagen ist nicht ausgeschöpft; hier besteht ein großes Potenzial für erneuerbare Energien im Produktionssektor (sehr wahrscheinlich).
- Für die Auswirkungen der in Österreich nachgefragten Güter und Dienstleistungen auf die globale THG-Konzentration ist nicht nur die Produktion in Österreich relevant. Bezieht man auch die durch österreichischen Konsum im Ausland verursachten Emissionen in die Betrachtung mit ein, so liegen die Emissionswerte für Österreich um etwa die Hälfte höher als in der UN-Bilanz angegeben, in der nur die Emissionen innerhalb der österreichischen Grenzen erfasst sind (hohes Vertrauen). Aus den Warenströmen lässt sich ableiten, dass die österreichischen Importe einen Großteil ihrer Emissionen in China sowie Süd- und Ostasien verursachen.

Gebäude

- Der Gebäude- und Wohnungsbestand in Österreich wächst seit 1961 in etwa linear. Der Sektor Raumwärme und sonstiger Kleinverbrauch trägt mit 28 % zum Endenergiebedarf und mit 14 % zu den österreichischen THG-Emissionen bei. Bei Neubauten wurde in den letzten Jahren ein beträchtlicher technologischer Fortschritt in Bezug auf die Reduktion des Heizenergiebedarfs realisiert. Im Gleichklang wurden sowohl die energetischen Anforderungen durch die Bauordnungen und die Wohnbauförderungen sukzessive erhöht (sicher, da Vergangenheit).
- Bedingt durch den Klimawandel wird es zu einer Reduktion des Heizwärmebedarfs um 20 % und einer Zunahme des Kühlbedarfs kommen. Trotzdem wird der Heizwärmebedarf für die meisten Gebäude den Kühlbedarf übersteigen (sehr wahrscheinlich).
- Die technischen Richtlinien für Bauteile werden an die geänderten Klimabedingungen angepasst werden (sehr wahrscheinlich).
- In den nächsten Jahren wird dieser Trend weiter forciert werden. Im Sinne des mit der europäischen Gebäuderichtlinie (Richtlinie 2010/31/EU, Neufassung 2010) eingeschlagenen Weges in Richtung „nearly zero energy buildings“ ist eine sehr ambitionierte Festlegung von Neubaustandards erforderlich, um langfristige Klimaschutzziele im Gebäudebereich zu erreichen (wahrscheinlich). Durch den hohen Anteil des Gebäudebestands und einer Neubaurate von ca. 1 % pro Jahr kommt der hochwertigen thermischen Gebäudesanierung ein hoher Stellenwert zu (sehr wahrscheinlich).
- Die im Neubau entwickelten Technologien werden z.T. auch bei der Sanierung einsetzbar sein (wahrscheinlich). Gleichzeitig werden auch kostengünstige und hochwertige Technologien zur Sanierung von Gebäuden zu entwickelt (wahrscheinlich).
- Die weitere Senkung der THG-Emissionen gelingt durch die optimale Einbindung der Nutzung von EET (sehr wahrscheinlich). Je geringer der Energiebedarf von Gebäuden ist, desto leichter fällt die Versorgung über erneuerbare Energieträger. Solarthermie und Photovoltaik werden zunehmend auf den nicht zur Belichtung notwendigen und entsprechend richtig ausgerichteten Flächen für die Energiegewinnung genutzt werden (wahrscheinlich). Der Einsatz von Wärmepumpen wird aufgrund der Skalierbarkeit hin zu sehr kleinen Baugrößen weiter forciert werden (wahrscheinlich). Biomasse wird kurz und mittelfristig noch weiter zunehmen, durch eine weitere Reduktion des Wärmebedarfs im Gebäudebereich und eine Zunahme der Umstellung von Mobilität und Industrie auf erneuerbare Energieträger aber eher im Bereich Industrie und Mobilität als im Bereich Gebäude ausgebaut werden (wahrscheinlicher als nicht). Nahwärmenetze werden mit zunehmender Effizienz der Gebäude eine geringere Rolle spielen, da das Verhältnis von Wärmeabgabe zu Netzverlusten immer ungünstiger werden wird (wahrscheinlicher als nicht).
- Der Haushaltsstromverbrauch wird ohne gravierende politische Eingriffe weiter deutlich ansteigen (wahrscheinlich). Zwar wird es durch effizientere Technologien bei bestehenden Anwendungen und der Beleuchtung zu Einsparungen kommen, der Gesamtstromverbrauch wird aber, vor allem durch die weitere Verbreitung neuer stromkonsumierender

Anwendungsbereiche bei gleichbleibendem niedrigen (realen) Niveau der Strompreise, zumindest moderat weiter steigen (gleich wahrscheinlich und unwahrscheinlich).

- Unter diesen Randbedingungen kann bis 2050 eine Abdeckung von etwa 90 % des Wärmebedarfs im Gebäudebereich durch EET erreicht werden (keine Wahrscheinlichkeit, aber äußerst wahrscheinlich, wenn die oben beschriebenen Randbedingungen eintreten).

5.1 Produktion
5.1 Production

Nahezu ein Drittel des globalen Energieeinsatzes und beinahe 40 % der weltweiten CO_2-Emissionen können industriellen Tätigkeiten zugerechnet werden (IEA, 2009). Der Großteil dieser Emissionen kommt aus dem Bereich der Herstellung von Grundmaterialien wie Chemikalien, Eisen / Stahl, Zement, Zellstoff / Papier und Aluminium. Ein Beitrag des produzierenden Sektors ist daher zur Erreichung von Klimazielen unumgänglich.

5.1.1 Die Rolle des Bereichs „Produktion" bei Energieverbrauch und Emissionen in Österreich

Der Energieeinsatz in der österreichischen Industrie war zwischen 1970 und 1995 mit 200 bis 250 PJ / Jahr relativ konstant, wuchs aber danach deutlich und überstieg 2005 die 300 PJ-Marke.

Im Zeitraum 1970 bis 1995, in dem kaum ein Zuwachs des Energieverbrauchs erfolgte, stieg der Produktionswert und die Produktionsmengen um knapp mehr als das Doppelte (errechnet aus Heilo Media, 2013). Dies ist darauf zurück zu führen, dass einerseits Produktionssteigerungen durch Effizienzerhöhungen im Rahmen der allgemeinen technischen Entwicklung kompensiert wurden, und andererseits darauf, dass es eine Strukturänderung im Bereich der Produktion gegeben hat. In den Jahren 1973 und 1980 erfolgten Einbrüche, die auf die damals aufgetretenen Energie(preis)krisen zurück zu führen sind. Der Anteil der elektrischen Energie schwankt in den letzten 30 Jahren ohne sichtbaren Trend um 30 %.

In den letzten 15 Jahren liegt ein völlig anderer Trend vor, der zu einer Steigerung des Energieeinsatzes um beinahe 50 % auf über 300 PJ / Jahr führte

Der Anteil der Industrie am gesamten nationalen Energieverbrauch ging im Zeitraum 1970 bis 1990 von ca. einem Drittel auf ein Viertel zurück und steigt seither wieder (Abbildung 5.1). Im Jahre 2010 betrug der Anteil des produzierenden Bereichs am gesamtösterreichischen Energieverbrauch 28,4 % (BMWFJ, 2012).

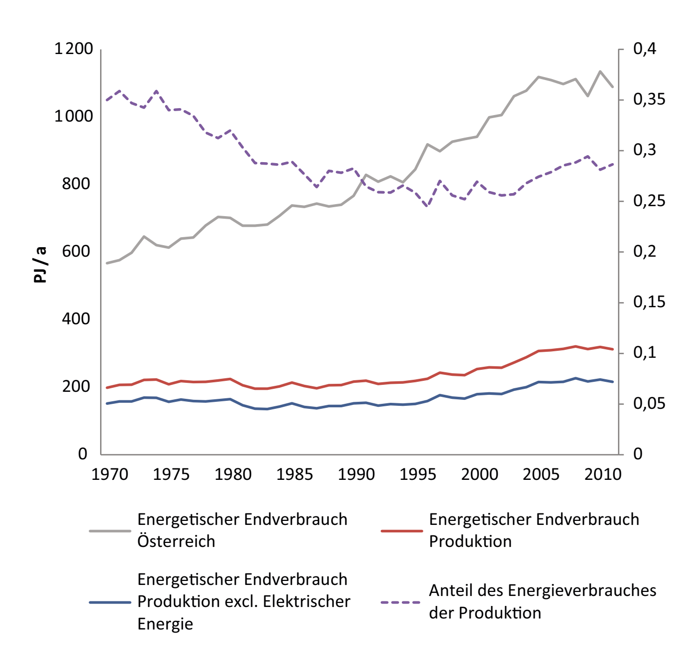


Abbildung 5.1 Bedeutung des Sektors „Produktion" beim Energieverbrauch in Österreich; Werte in PJ / Jahr. Quelle: Statistik Austria (2012); eigene Darstellung

Figure 5.1 Relevance of the sector „production" in Austria's energy system; values in PJ / year. Source: Statistik Austria (2012); own graphic

Wie Abbildung 5.2 zeigt, ist der Hauptenergieträger für den produzierenden Bereich Gas, die elektrische Energie liegt in der selben Größenordnung. Die Einsatzmengen an Kohle und Öl haben sich in den letzten Jahre kaum geändert. Das liegt daran, dass die Kohle zu einem großen Teil aus prozesstechnischen Gründen (z. B. als Kohlenstoffträger) und nur zu einem geringen Teil als Energieträger eingestetzt wird.

Der Einsatz von Öl beinhaltet den Bereich „Traktion", also den Betrieb von Motoren, der besonders in der Bauwirtschaft bedeutsam ist, da die Baumaschinen hier in der Statistik aufscheinen.

Wie auch aus Abbildung 5.2 ersichtlich, sind die THG-Emissionen aus dem Sektor „Industrie und produzierendes Gewerbe" zwischen 1990 und 2010 um 16,2 % (+3,4 Mt) angestiegen (Anderl et al., 2012).

Neben den direkten, in der Statistik erfassten, Emissionen durch den Einsatz verschiedener Energieträger verursacht der Sektor „Produktion" über den Einsatz elektrischer Energie auch Emissionen im Sektor „Bereitstellung". Maßnahmen zur Energieeffizienz und Technologieumstellungen bei der Produktion führen daher oftmals zu Veränderungen bei der Bereitstellung; diese Tatsache wurde in der wissenschaftlichen Literatur

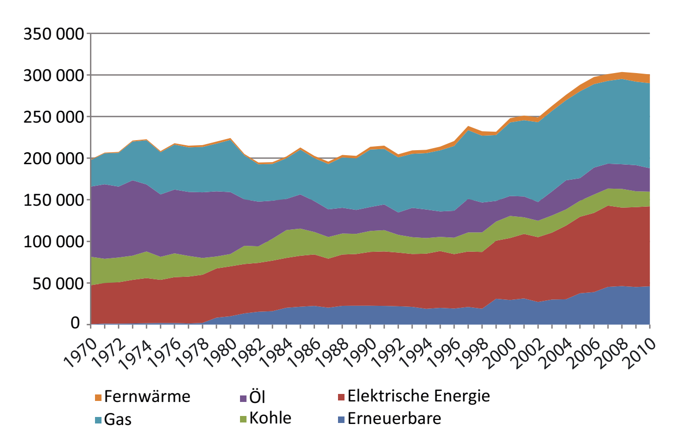


Abbildung 5.2 Energiebedarf des produzierenden Sektors nach Energieträgern (PJ/Jahr). Daten: Statistik Austria (2012); eigene Darstellung

Figure 5.2 Energy consumption in PJ/year of the sector „production", differentiated according to the energy sources. Data: Statistik Austria (2012); own graphic

im österreichischen Energiesystem bisher nicht untersucht. Die meisten Betriebe arbeiten – oftmals in Kooperation mit ihren Branchenvertretungen – an individuellen Umsetzungen von Maßnahmen zur Energieeffizienz, werten diese aber kaum in der wissenschaftlichen Literatur aus. Spartenorganisationen schreiben national und in europäischer Abstimmung an Strategien, aber auch diese sind selten wissenschaftlich publiziert und evaluiert. Die wichtigsten Publikationen werden bei den Branchenkonzepten in den folgenden Abschnitten erwähnt.

Die wichtigsten Branchen – gemessen an ihren THG-Emissionen – sind in Tabelle 5.1 dargestellt.

Energie erfüllt in industriellen Produktionsprozessen verschiedene Energiedienstleistungen (Statistik Austria, 2008):

- Chemische Energiedienstleistungen: 0,08 % des gesamten Energiebedarfs der Industrie; rein elektrische Energie.
- Standmotoren: 22 % des gesamten Energiebedarfs der Produktion; davon 19 % Öl, 80 % elektrische Energie und 1 % andere.
- Thermischer Energiebedarf: 63 % der Energiedienstleistungen in der Produktion; alle Energieträger; eingeteilt in 3 Temperaturbereiche: 0–100 °C; 100–400 °C; > 400 °C; 37 % des thermischen Energiebedarfs liegen unter 100 °C.
- EDV, Beleuchtung: 2 % des gesamten Energiebedarfs der Produktion; nur elektrische Energie.

5.1.2 Die Rolle des Außenhandels am Beitrag Österreichs zu den globalen Emissionen

Im Rahmen der Richtlinie der United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) werden alle Emissionen jenem Land zugerechnet, innerhalb dessen Grenzen sie ausgestoßen werden (Territorialprinzip, produktionsbasierte Zurechnung). In jüngerer Zeit wird zunehmend eine alternative Möglichkeit zu dieser Zurechnung diskutiert. Sie besteht darin, Österreich (bzw. jedwedem anderen Land) alle jene Emissionen zuzurechnen, die – egal wo – auf unserem Planeten entstehen, sofern sie durch Produktionsprozesse, aus denen Güter entstehen, die dann letztlich in Österreich verbraucht werden (konsumbasierte Zurechnung), ausgelöst werden. Geht man von den Emissionen nach produktionsbasierter Zurechnung aus, sind von diesen all jene Emissionen abzuziehen, die in der Produktion von Gütern (z. B. Stahl) in Österreich entstehen, die letztlich ins Ausland exportiert werden, und umgekehrt jene Emissionen hinzuzuzählen, die in anderen Ländern (z. B. in China) bei der Produktion von Gütern (z. B. Mobiltelefone), die dann in Österreich von Konsumenten gekauft werden, entstehen. Diese konsumbasierte Zurechnung zeigt auf, für welche Emissionsmengen der Endverbraucher letztlich durch seinen Konsum verantwortlich

Tabelle 5.1 Hauptverursacher von THG-Emissionen in Mt CO_2-Äq. innerhalb des Sektors „Produktion" sowie die Veränderungen in %. Quelle: Anderl et al. (2012)

Table 5.1 Major sources of greenhouse gases in Mt CO_2-eq. of the sector production and changes of the emissions in %. Source: Anderl et al. (2012)

Hauptverursacher	1990	2009	2010	Veränderung 2009–2010	Veränderung 1990–2010	Anteil an den nationalen THG-Emissionen 2010
Eisen- und Stahlproduktion (energie- und prozessbedingte Emissionen)	8504	9688	11315	16,8 %	33,1 %	13,4 %
Sonstige Industrie ohne Eisen- und Stahlproduktion (energiebedingte Emissionen)	7815	9593	9764	1,8 %	24,9 %	11,5 %
Mineralverarbeitende Industrie (prozessbedingte Emissionen)	3274	2916	2936	0,7 %	–10,3 %	3,5 %
Chemische Industrie (prozessbedingte Emissionen)	1509	722	689	–4,5 %	–54,3 %	0,8 %

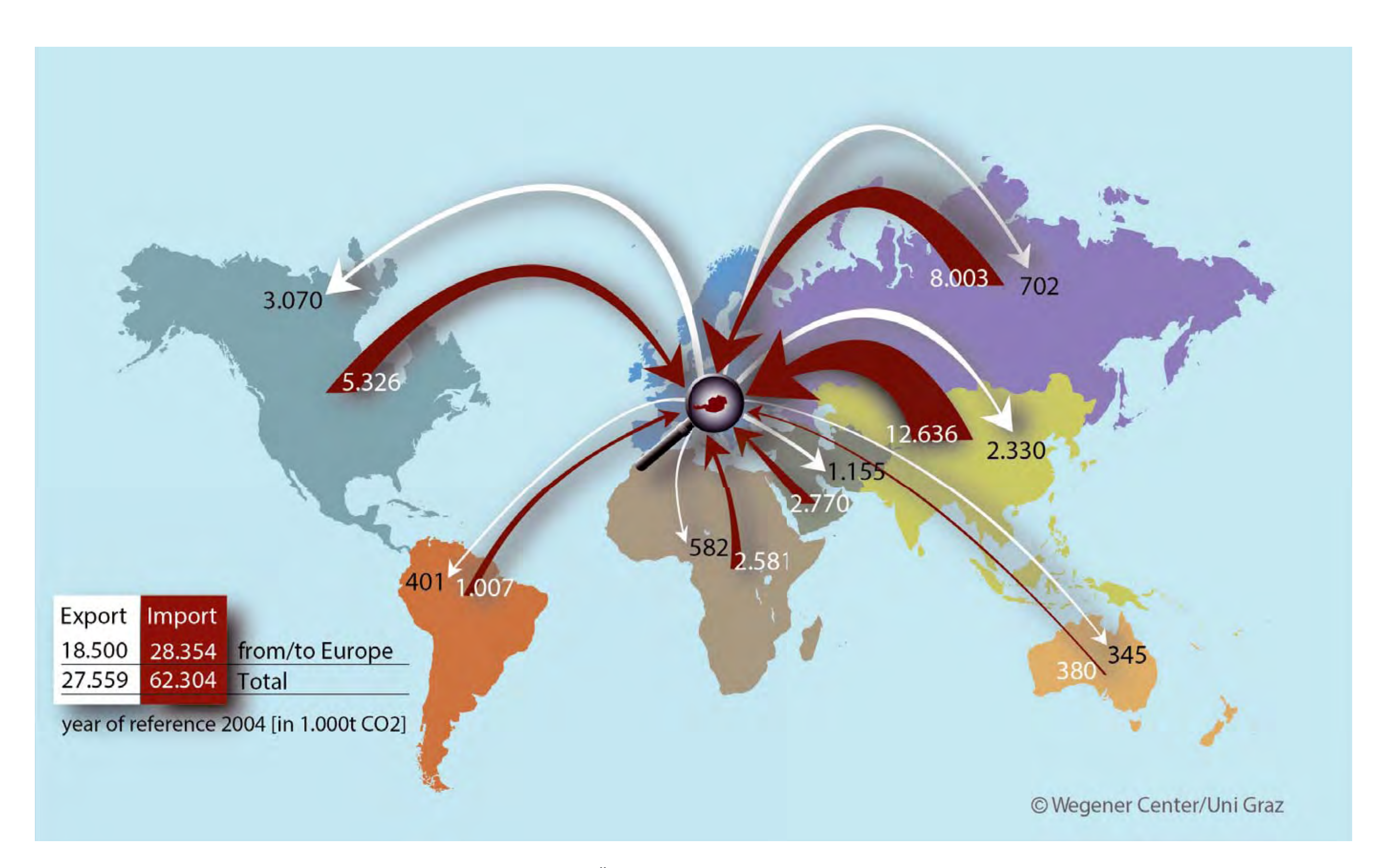


Abbildung 5.3 CO_2-Ströme im Güterhandel aus bzw. nach Österreich, nach Weltregionen. Quelle: Munoz und Steininger (2010)
Figure 5.3 Implicit embodied CO_2-flows within foreign trade flows from and to Austria, by world region. Source: Munoz and Steininger (2010)

ist – egal, wo auf der Welt diese Emissionen entstehen. Denn da Treibhausgase global wirksam sind, ist der Entstehungsort letztlich irrelevant.

In den letzten Jahren zeigte sich, dass etwa die EU zwar erfolgreich ihre territorial-basierten Emissionen senken konnte, dass gleichzeitig aber die Emissionen, die der Endverbrauch der EU weltweit verursachte (somit die konsumbasierten Emissionen) anstiegen. Für die EU-27 nahmen die territorialbasierten Emissionen (1990 bis 2010) um durchschnittlich 0,4 % pro Jahr ab, während die konsum-basierten um 0,1 % pro Jahr anstiegen (Peters et al., 2012)! Für Österreich liegen Berechnungen der konsumbasierten CO_2-Emissionen für zwei Jahre vor: 1997 und 2004. Innerhalb dieses Zeitraums stiegen die österreichischen territorial-basierten Emissionen um durchschnittlich 2,4 % pro Jahr, während die konsumbasierten Emissionen signifikant stärker, um durchschnittlich 3,3 % pro Jahr stiegen (Munoz und Steininger, 2010).

Bezogen auf die absoluten Mengen ergibt sich das folgende Bild, wenn man diese „grauen" THG-Emissionen, die im Außenhandel enthalten sind, berücksichtigt: betrachtet man nicht nur die innerhalb der österreichischen Grenzen emittierten Treibhausgase, sondern bezieht einerseits die durch den österreichischen Konsum ausländischer Produkte weltweit verursachten Emissionen mit ein und zieht umgekehrt jene Emissionen im Inland ab, für die die österreichischen Exporte verantwortlich sind, so erhält man die Konsumverantwortlichkeit Österreichs. Diese lag 1997 um 38 %, 2004 bereits um 44 % über den gemäß der UNFCCC-Statistik für Österreich ausgewiesenen Emissionen. Österreich ist somit derzeit durch seinen Konsum für rund 50 % mehr CO_2-Emissionen verantwortlich, als ihm gemäß offizieller Statistik zugerechnet werden.

Abbildung 5.3 zeigt diese in den Import-Güterströmen nach Österreich hereinkommenden so genannten „grauen" Emissionen (also jene Emissionen, die den Gütern zurechenbar sind, weil sie in deren Produktion entstanden sind) – dunkle (rote) Pfeile – nach Weltregionen und stellt sie den aus Österreich in den Export-Strömen hinaus fließenden grauen CO_2-Strömen gegenüber (weiße Pfeile). Insbesondere in der Bilanz mit Asien (sowohl Indien und Südostasien, als auch China) ist der deutliche Netto-Import an konsumbasierten Emissionen nach Österreich sichtbar.

Dieses Faktum – und seine jüngst zunehmende Bedeutung – ist insofern von höchster Relevanz, als eine Emissionsverrin-

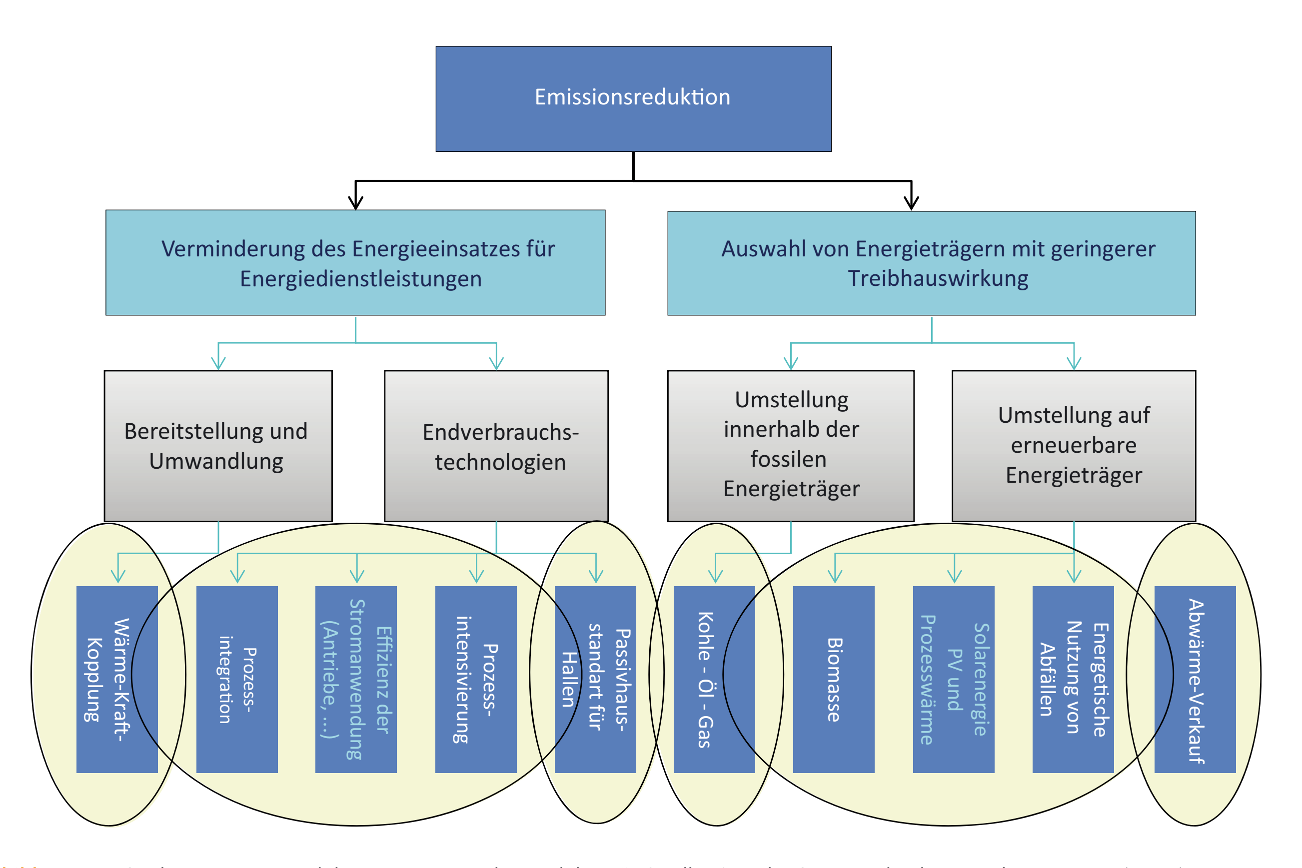


Abbildung 5.4 Struktur-Emissionsreduktionen im Bereich „Produktion". Quelle: Amt der Steiermärkischen Landesregierung (2010)

Figure 5.4 Structured presentation of the possibilities to reduce the emission of climate change gases in the sector „production". Source: Amt der Steiermärkischen Landesregierung (2010)

gerung innerhalb der österreichischen Grenzen alleine dann für das Weltklima wirkungslos bliebe, wenn sich die Nachfragestruktur in Österreich nicht ändert, und die gleichen (THG-intensiven) Produkte weiter konsumiert werden, nur einfach dann nicht mehr im Land produziert, sondern importiert werden. Eine solche Entwicklung konnten wir in den letzten Jahren beobachten. Auch bei allen Überlegungen zu einem „energieautarken" Österreich ist letztlich jedenfalls auch die in den Außenhandelsströmen implizit enthaltenen „graue" fossile Energie (und damit graue Emissionen) mit zu berücksichtigen, wenn eine gesamtheitliche Betrachtung das Ziel ist. Und eine solche Betrachtung ist für global wirksame Treibhausgase wohl die einzig zulässige.

5.1.3 Grundsätzliche Möglichkeiten zur Verminderung der Emission von Treibhausgasen

Emissionsminderungen von klimawirksamen Gasen aus dem Energieeinsatz können im Bereich Produktion, wie auch generell, einerseits dadurch erfolgen, dass der Endenergieverbrauch reduziert wird und andererseits dadurch, dass eine Umstellung auf emissionsärmere Energieträger erfolgt (Abbildung 5.4). Prozessbedingte CO_2-Emissionen sind nur durch Produktions- oder Produktinnovationen zu vermindern. Die Reduktion anderer Treibhausgase (Methan, Stickoxide, Fluorkohlenwasserstoffe, …) kann ebenfalls nur prozessspezifisch erfolgen.

Energieverbrauchsminderungen ihrerseits können einerseits durch die Verminderung der Verluste in der Umwandlungskette erfolgen und andererseits durch die Reduktion der zum Erzielen einer Dienstleistung erforderlichen Mengen. Für die Umstellung auf Energieträger mit geringerer Treibhauswirkung gibt es die Möglichkeit eines Umstiegs innerhalb der fossilen Energieträger wie auch eine Umstellung auf erneuerbare Energien. Darüber hinaus können Abwärmeströme aus der Produktion über Nah- und Fernwärmenetze einer externen Nutzung zugeführt werden. Auch diese gesamtwirtschaftlich sinnvolle Maßnahme vermindert THG-Emissionen in anderen Bereichen mit einer eventuellen Emissionssteigerung im Bereich Produktion.

In weiterer Folge werden zwei Zugänge zur Beschreibung von Maßnahmen gewählt: für die energieintensiven Branchen erfolgt eine branchenspezifische Darstellung, für branchenübergreifende Ansätze erfolgt eine technologiespezifische Dar-

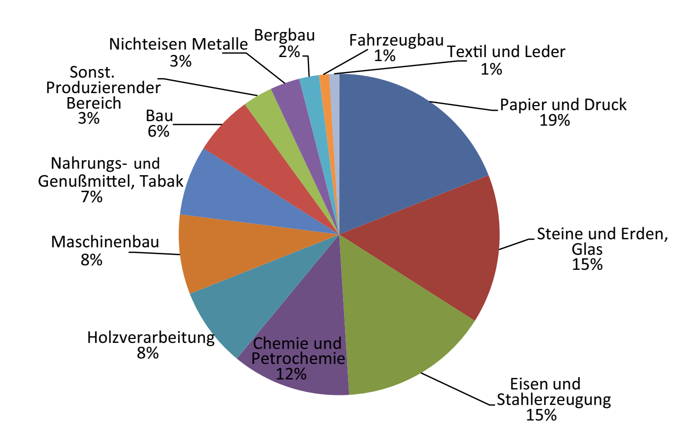


Abbildung 5.5 Endenergiebedarf nach Sektoren 2010. Quelle: Statistik Austria (2012); eigene Darstellung

Figure 5.5 Final energy represented for the production sectors. Source: Statistik Austria (2012); own graphic

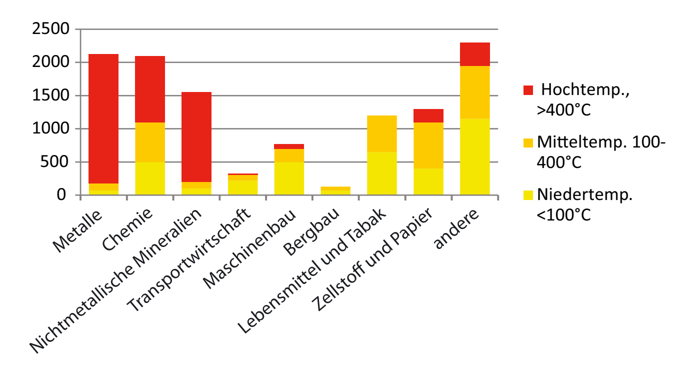


Abbildung 5.6 Energieeinsatzmengen und deren Temperaturniveaus in Europa (EU25 + ACC4 + EFTA3 im Jahr 2003) nach Industriesektoren. Quelle: ECOHEATCOOL (2006)

Figure 5.6 Amounts of energy and their temperature level in Europe (EU25 + ACC4 + EFTA3 in 2003) represented to the sectors. Source: ECOHEATCOOL (2006)

stellung. Die größten Betriebe der energieintensiven Sektoren unterliegen dem EU-Emission Trading System (ECT); rund drei Viertel der Emissionen, die diesem Bereich zugeordnet werden, werden von Anlagen verursacht, die dem Emissionshandel unterliegen.

Zu Methoden der Emissionsminderung gibt es wenige wissenschaftliche Publikationen, die über die Beschreibung von Fallstudien hinausgehen; die wesentlichen Fallstudien werden bei den jeweiligen Branchen erwähnt. Die beschriebenen Maßnahmen leiten sich daher aus Einzelaktivitäten bzw. nationalen und internationalen Konzepten ab, die eher strategischer als wissenschaftlicher Natur sind. Die Europäische Kommission gibt 2007 das Energiesparpotenzial für die verarbeitende Industrie bis 2020 mit 25 % an, ohne auf Maßnahmen oder Strategien einzugehen (Europäische Gemeinschaften, 2007).

5.1.4 Die wesentlichen Sektoren bezüglich der Emission von Treibhausgasen nach NACE

Nur wenige Sektoren bestimmen den Energieverbrauch und damit die THG-Emissionen des produzierenden Bereichs. Mit den fünf wichtigsten Bereichen deckt man in Österreich mehr als zwei Drittel des Energieeinsatzes ab (Abbildung 5.5).

Die einzelnen Sektoren unterscheiden sich aber nicht nur nach dem Energiebedarf, sondern auch nach den Temperaturen der eingesetzten Wärmeenergie (energetische Qualität). Diese unterschiedlichen Temperaturniveaus wirken sich stark auf das Potenzial möglicher Energiespartechnologien aus, wie auch auf die Möglichkeiten des Einsatzes erneuerbarer Energieformen.

Außer der Metallerzeugung (NACE 24) und der Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik sowie der Verarbeitung von Steinen und Erden (NACE 23) gibt es nur noch in der chemischen Industrie nennenswerte Produktionsprozesse im Hochtemperaturbereich (Abbildung 5.6).

In den folgenden Abschnitten werden daher nur die Aktivitäten in ausgewählten Sektoren beschrieben; die anderen Sektoren werden durch die im Abschnitt 5.1.4 beschriebenen Technologiemaßnahmen abgedeckt. Wie man aus Abbildung 5.7 erkennen kann, haben die wichtigsten Sektoren in den letzten Jahren nur teilweise die größten Zuwächse am Energiebedarf gehabt. Während der Energieeinsatz bei der Eisen- und Stahlerzeugung gleich geblieben ist, hat der Sektor „Chemie und Petrochemie" ein starkes Wachstum zu verzeichnen. Papier und Druck sind von einem hohen Niveau her noch weiter gewachsen.

Herstellung von Nahrungs- und Futtermitteln (NACE 10) und Getränkeherstellung (NACE 11)

Der Sektor der Lebensmittelindustrie ist durch eine große Anzahl verschiedenster und oft kleiner Betriebe ausgezeichnet. Die betriebswirtschaftliche Bedeutung des Energieeinsatzes ist oft gering. Die erforderlichen Temperaturniveaus sind ebenfalls eher gering, großteils unter 100 °C.

Aus einer Studie des Niederländischen Wirtschaftsministeriums ergeben sich folgende Energieeffizienzpotenziale (Ministry of Economic Affairs, 2008) in unterschiedlichen Zeiträumen:

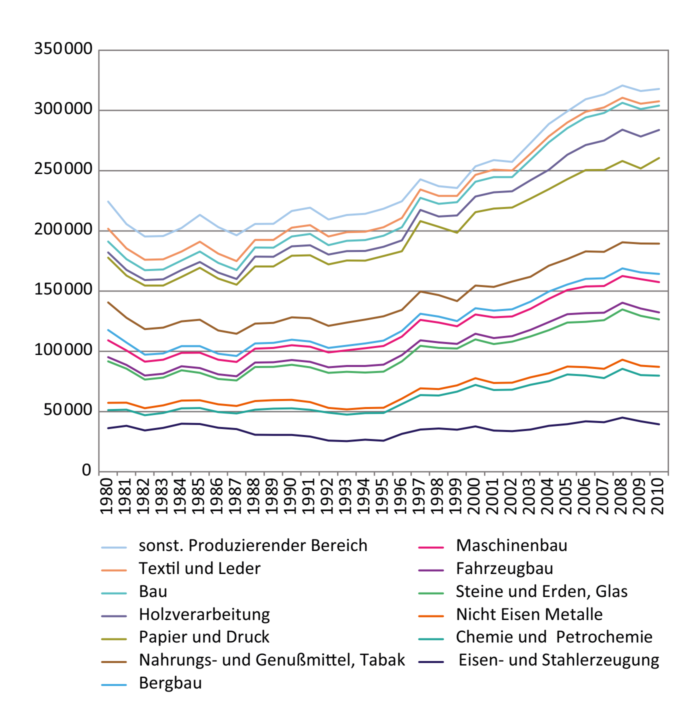


Abbildung 5.7 Entwicklung des Energieeinsatzes in den Industriesektoren Österreichs seit 1980; Werte in GJ/Jahr. Quelle: Statistik Austria (2012)

Figure 5.7 Development of the energy demand in the industrial sectors in Austria since 1980; values in GJ/year. Source: Statistik Austria (2012)

- Lebensmittelbestandteile (INFOOD):
  - Erhöhte Effizienz bei der Entwässerung –25 % (5–10 Jahre), 75 % (10–15 Jahre)
  - Prozessintensivierung in der Verarbeitung entlang der gesamten Versorgungskette –30 % (10 Jahre), 60 % (30–40 Jahre)
- Fertige Lebensmittel (CONFOOD):
  - Höhere Effizienz bei den Konservierungsprozessen –10–15 % (10 Jahre), 30–40 % (40 Jahre)
  - Kapazitätserweiterungen –60 % (40 Jahre)
  - Umstellung von Chargenbetrieb auf kontinuierliche Verfahren –30 % (40 Jahre)

Über den Einsatz erneuerbarer Energien in der Lebensmittelindustrie lief bis 2013 das Forschungsprojekt SolarFoods, welches auf einer Studie über energieautarke Brauereien aufbaut (Muster-Slawitsch et al., 2010). SolarFoods war ein österreichisches Forschungsprojekt, in dem ein „Solares Branchenkonzept" für die Lebensmittelindustrie in enger Kooperation mit heimischen Betrieben dieses Industriezweigs erarbeitet wurde.

In dem Projekt wurden technisch mögliche Effizienzmaßnahmen und Optionen zur Integration von Solarthermie und anderen erneuerbaren Energieträgern in die Prozesse der heimischen Lebensmittelbranche untersucht, sowie deren wirtschaftliche Machbarkeit betrachtet.

Das Branchenkonzept beinhaltet folgende Punkte, die den Unternehmen frei zur Verfügung stehen:

- Ein Planungstool zur Beurteilung des eigenen Betriebs;
- Leitfäden für unterschiedliche Subbranchen;
- Eine Solar-Roadmap für die Lebensmittelindustrie mit möglichen Zukunftsbildern und politischen Handlungsempfehlungen.

Die Lebensmittelindustrie ist durch ihre große Nähe zur Landwirtschaft ausgezeichnet. Diese Kombination bietet sich als Partnerschaft zu Bioraffineriesystemen an, in denen nicht nur jene Pflanzenbestandteile, die zur Lebensmittelproduktion verwendet werden, an die Industrie geliefert werden, sondern auch die nur energetisch verwendbaren (Schnitzer, 2013). Ein derartiges Low-Carbon-System könnte die gesamte Lebensmittelverarbeitung CO_2-neutral machen (Abbildung 5.8) (Schnitzer, 2013).

Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus (NACE 17)

Für die Herstellung von Zellstoff und Papier wird sehr viel Energie benötigt (22 % des gesamten Energieeinsatzes der Produktion). Der Einsatz der fossilen Brennstoffe Kohle und Öl ist seit Jahren rückläufig, sie werden zunehmend durch biogene Brennstoffe und Erdgas ersetzt. Die hohe Eigenstromproduktion der Branche entlastet die Stromnetze und vermindert die Gefahr von Produktionsstörungen. Dieser Sektor hat eine europäische Strategie mitentwickelt, wie die energetischen Herausforderungen bis 2050 zu meistern sind (CEPI, 2011) (siehe Box 5.1).

Die industrielle Papierverarbeitung in Österreich umfasst 105 Unternehmen mit 115 Produktionsbetrieben. Der jährliche Produktionswert beträgt rund 2 Mrd. €, die Produktionsmenge 1,1 Mt. Die Papierverarbeitungsindustrie ist klein- und mittelbetrieblich strukturiert, sie beschäftigt rund 10 000 Mitarbeiter, die Betriebsgrößen liegen zwischen 30 und 500 Beschäftigten. Aus dem Bereich der Papierverarbeitung sind keine besonderen Aktivitäten zu Verminderung von THG-Emissionen bekannt, die über die laufenden Technologieinnovationen hinausgehen.

Die internationale Energieagentur (IEA, 2009) schätzt, dass global durch die Anwendung der besten verfügbaren Technologien (BAT) bis zu 25 % des derzeitigen Energieeinsatzes ein-

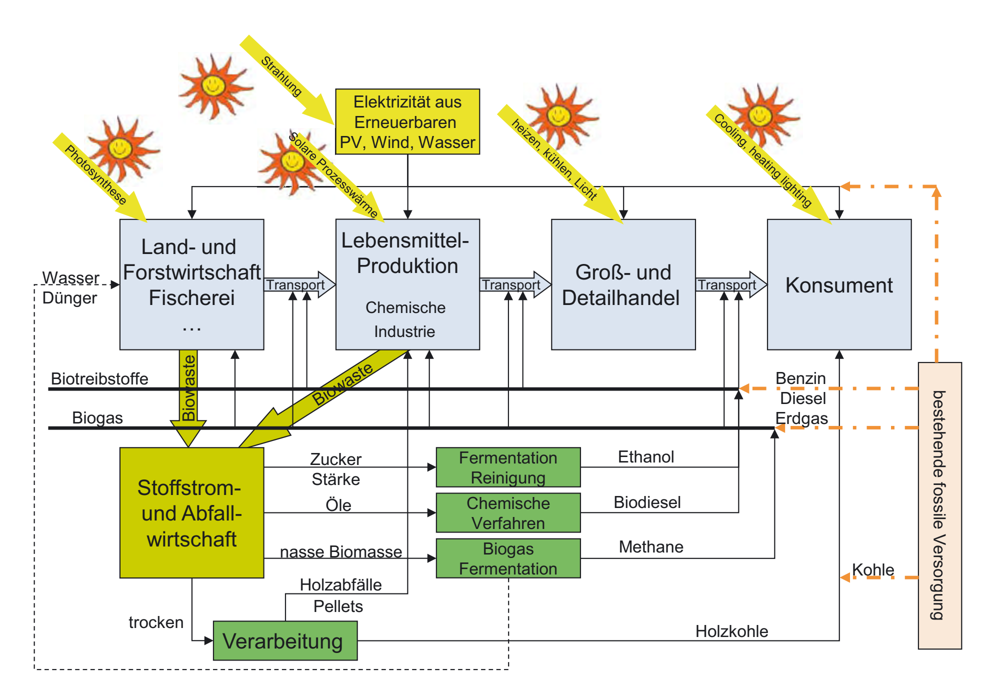


Abbildung 5.8 Grundsätzlicher Aufbau eines CO_2-neutralen Bioraffineriesystems in den Bereichen Landwirtschaft/Lebensmittelindustrie. Quelle: Schnitzer (2013)
Figure 5.8 Design of a CO_2-neutral biomass refinery system in the agro-food sector. Source: Schnitzer (2013)

gespart werden könnten. Diese Zahl ist aber nicht direkt auf die österreichischen Werke übertragbar.

Da die meisten Werke der Zellstoff- und Papierbranche große Verbrennungsanlagen mit Wärme-Kraft-Kopplungen auf Basis nachwachsender Energieträger (Rinde, Spuckstoffe, Lauge etc.) haben, besitzt diese Branche ein großes Potenzial zur Auskoppelung von Wärme für Fernwärmeanlagen (Schnitzer et al., 2012). Hierbei werden nicht nur unmittelbar angrenzende Städte bedient sondern durchaus auch größere Regionen (z. B. Murtal: Pöls – Judenburg – Zeltweg – Fohnsdorf).

Herstellung von chemischen Erzeugnissen (NACE 20)

Der internationale Chemieverband ICCA verfasste 2009 die Studie „Innovations for Greenhouse Gas Reductions" (ICCA, 2009). Auf diese Studie verweist auch die österreichische Chemische Industrie. Die Arbeit beschäftigt sich hauptsächlich mit Lebenszyklusanalysen der chemischen Produkte und kommt zur Einsicht, dass chemische Produkte mehr Energie einsparen, als sie bei der Herstellung benötigen.

Neben der Bestandsaufnahme für das Jahr 2005 entwirft die Studie zwei Szenarien für die Zukunft – eines, das den jetzigen Stand der Technologie fortschreibt, sowie eines, das weitere Anstrengungen in Sachen Klimaschutz von Industrie und Politik einbezieht. Die Studie kommt zu dem Schluss, das Zukunftspotenzial der chemischen Industrie in Bezug auf Treibhausgas-Reduktion ist enorm und sieht zwei Szenarien (FCIO, undated):

- Szenario 1: Business-as-usual. Werden keine weiteren Maßnahmen für die Senkung von Emissionen umgesetzt, wird die chemische Industrie 2030 durch die steigende Nachfrage die Emissionen weltweit verdoppeln. Im gleichen Zeitraum sparen Chemieprodukte durch Effizienz-

Box 5.1: Roadmap der Faserholzindustrie
Box 5.1: Roadmap of the fibre wood industry

„Diese Roadmap bemüht sich, die Zukunft der Faserholzindustrie – Zellstoff, Papier, Platten und Holzprodukte – darzustellen und ihr Potential, den zu erwartenden Bedarf der Kunden zu befriedigen und gleichzeitig konkurrenzfähig zu bleiben. Dabei sollen im Vergleich mit 1990 die CO_2-Emissionen bis 2050 um 80 % reduziert werden. Die Roadmap untersucht die technischen, finanziellen und ressourcenbezogenen Limitierungen, die zu erwarten sind, sowie die zu ihrer Bewältigung erforderlichen politischen Rahmenbedingungen. Die Untersuchung zeigt, dass eine Emissionsreduktion von CO_2 um 50 % bis 2050 mit bestehenden und in Entwicklung befindlichen Technologien möglich ist, sofern die passenden Umstände bestehen. Um eine Reduktion um 80 % zu erreichen, werden aber bahnbrechende neue Technologien benötigt. Diese müssen bis 2030 entwickelt und einsatzbereit sein!" (CEPI, 2011; Übersetzung: Schnitzer)

steigerungen drei mal mehr CO_2 ein, als deren Produktion verursacht.
- Szenario 2: Zusätzliche Einsparungen. Im Jahr 2030 könnten die Chemieprodukte bis zu 4,7 mal mehr Emissionen im Vergleich zum Produktionsausstoß einsparen, insgesamt bis zu 18,5 Mt CO_2. Als Basis wurde in dieser Berechnung der Einsatz von neuen Technologien zur weiteren Effizienzsteigerung in der Produktion herangezogen. Diese jedoch sind – insbesondere für Unternehmen in Österreich, die schon heute auf dem modernsten Stand der Technik produzieren – sehr kostenintensiv.

Die Studie des Niederländischen Wirtschaftsministeriums über mögliche Energieeinsparungen durch Prozessintensivierung (Ministry of Economic Affairs, 2008) ergibt folgendes Potenzial in der chemischen Industrie:

- Petrochemische Produkte und Massenchemikalien (PETCHEM): Insgesamt höhere Effizienz −5 % (10–20 Jahre), 20 % (30–40 Jahre)
- Spezial- und Feinchemikalien, pharmazeutische Produkte (FINEPHARM): Reduktion der Produktionskosten (und hierdurch verursachte Energieeinsparungen durch die gestiegene Rohstoffnutzung) −20 % (5–10 Jahre), 50 % (10–15 Jahre)

Auch die IEA bezeichnet die Prozessintensivierung und den verstärkten Einsatz von Wärme-Kraft-Kopplungen als das bedeutende Potenzial.

Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden (NACE 23)

Bei der Glasindustrie handelt es sich weltweit um eine relativ kleine, aber sehr heterogene Branche. In Österreich gibt es ca. 60 Unternehmen (aus den Bereichen Glashütte, Glasbe- und -verarbeiter, Gablonzer) mit insgesamt knapp 9 000 Beschäftigten. Die österreichische Glasindustrie konnte im Jahr 2011 einen Produktionswert von 1 294 Mrd. € erwirtschaften, welcher damit gegenüber dem Vorjahr um nominell um 0,06 % angestiegen ist. (Fachverband der Glasindustrie, 2011).

Der Prozess des Glasschmelzens ist sehr energieintensiv, weshalb Unternehmen, welche mehr als 20 t Glas pro Tag schmelzen, auch dem Emissionshandel unterworfen sind. Ein wesentliches Potenzial zur Energieeinsparung besteht in der Verwendung von rezykliertem Altglas. Das in Österreich gesammelte Altglas wird zu 100 % rezykliert. Der Anteil von Altglas am Rohstoffgemenge beträgt bei Grünglas bis zu 90 %, bei Weißglas bis zu 60 %. Damit bestehen im Durchschnitt alle in Österreich produzierten Glasverpackungen zu zwei Drittel aus Altglas. Für die CO_2-Reduktion bedeutet dies, dass bei der Neuproduktion je 10 % Altglas, 3 % Energie und 7 % CO_2-Emissionen reduziert werden. Laut dem Nachhaltigkeitsbericht der Austria Glas Recycling (2012) wurden durch die stoffliche Verwertung des gesammelten Altglases in Österreich im Jahr 2011 folgende Rohstoffe eingespart:

- 161 000 t Quarzsand,
- 52 000 t Kalk und Dolomit,
- 40 000 t Soda,
- 564 m^3 Abbauvolumen,
- 210 000 m^3 Deponievolumen für Einwegglas,
- 221 000 000 kWh elektrische Energie,
- 6 000 000 m^3 Erdgas.

Die gesammelten Mengen haben sich in den letzten Jahren nicht mehr entscheidend verändert und weisen auch kein nennenswertes Wachstumspotenzial auf.

Die Ziegelindustrie arbeitet an einem Forschungsprojekt „Syngas“: hier wird versucht, aus Abfällen ein synthetisches Schwachgas zu gewinnen, welches im Ziegelproduktionsprozess Anwendung findet (Papsch, 2012).

Die Zementindustrie ist energieintensiv und ein bedeutender Emittent von CO_2, wobei hier zwei Quellen vorhanden sind: CO_2 aus dem Energieeinsatz in den Öfen und CO_2 aus der chemischen Reaktion des Brennvorgangs. Im Auftrag der Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie (VÖZ) haben das Forschungsinstitut der Zementindustrie (FIZ), Düsseldorf, und die Firma Allplan, Wien, die Situation der österreichischen Zementindustrie im Hinblick auf Energieeffizienz und Energieeinsparpotenziale untersucht. Dieser Bericht fasst die energetische Analyse der gesamten österreichischen Zementindustrie sowohl in standortspezifischen Kennzahlen als auch in aggregierter Form zusammen. Die österreichische Zementindustrie betreibt (2007) neun Zementwerke mit Klinkerproduktion sowie drei Mahlwerke für Zement und eine Umladestation für Zement. Die installierte Produktionskapazität betrug 2007 etwa 4,6 Mt Klinker pro Jahr und wird etwa zu 87 % ausgeschöpft. Der durchschnittliche gewichtete Brennstoffenergiebedarf über alle Klinker produzierenden Zementwerke betrug 3 646 kJ / kg Klinker (Richtwerte aus IEA, 2009: 2,9–4,7 kJ / kg inklusive Strom). Aus der Gegenüberstellung dieses durchschnittlichen Brennstoffenergiebedarfs und den aggregierten Ergebnissen aus der Modellierung ergibt sich ein Einsparpotenzial von 2,2–6,5 % (Allplan, 2007).

Signifikante Verbesserungen der thermischen Energieeffizienz sind bei den untersuchten Zementdrehrohrofenanlagen nur durch vollständigen Neubau oder weitgehenden Umbau der Ofenanlagen möglich. Die österreichische Zementindustrie verfügt über ein nutzbares Abwärmepotenzial von 419 GWh oder ca. 10,5 % des Brennstoffenergieeinsatzes (Allplan, 2007). Die Abwärmenutzung an den Standorten ist allerdings nur in einzelnen Fällen wirtschaftlich möglich. Der Einsatz von ORC-Prozessen zur Herstellung elektrischer Energie aus Abwärme weist das höchste Potenzial von ca. 49 GWh mit einer durchschnittlichen Amortisationszeit von neun Jahren auf. Die wesentlichen betrieblichen Optimierungspotenziale von Mahlanlagen mit Kugelmühlen liegen in der Verbesserung des Sichter-Trenngrades sowie in der Optimierung der Kugelfüllung an die vorliegende Mahlung (Allplan, 2007).

Bei den Querschnittstechnologien wurden von Allplan an einigen Standorten Optimierungspotenziale mit Amortisationszeiten von weniger als 5 Jahren festgestellt. Die in der Gesamtenergiebilanz relativ unbedeutende Beleuchtung weist ein technisches Optimierungspotenzial von 2,5 GWh / Jahr bei einer durchschnittlichen Abschreibung von 5 Jahren auf, wohingegen die Druckluftversorgung in den letzten Jahren weitgehend optimiert wurde. Das entscheidende Potenzial zur Verminderung des Energieeinsatzes bei der Zementherstellung liegt in der Substitution des Zementklinkers im Zement durch andere Zement-Hauptbestandteile. Der Klinker / Zement-Faktor der österreichischen Zementindustrie betrug 75,4 % über die untersuchten Zementsorten. Eine energetische Einsparung von ca. 193 TJ ergäbe sich bei einer weiteren Absenkung des Klinker / Zement-Faktors je Prozent.

Metallerzeugung und -bearbeitung (NACE 24)

Dieser Sektor umfasst die energetisch wichtige Erzeugung von Roheisen, Stahl und Ferrolegierungen (NACE 24.1), die Erzeugung und erste Bearbeitung von NE-Metallen (NACE 24.4) und Gießereien (NACE 24.5).

Die bestehenden Technologien im Bereich Eisen / Stahl weisen nur mehr ein geringes Verbesserungspotenzial auf, weshalb die Notwendigkeit nach ganz neuen Technologien besteht (IEA, 2009). Eine Umstellung des Brennstoff-Mischungen beinhaltet Potenzial zu Emissionsreduktionen (verstärkter Gaseinsatz – „direct reduced iron“ (DRI), torrefiziertes Holz oder Holzkohle), wobei zu berücksichtigen ist, dass auch Biomasse nicht völlig frei von treibhauswirksamen-Emissionen ist.

Österreich ist Partner im Forschungsprojekt ULCOS (Ultra-Low Carbondioxide Steelmaking). Dieses Programm hat sich zum Ziel gesetzt, die CO_2-Emissionen bei der Stahlherstellung um mindestens 50 % – verglichen mit den besten heutigen Technologien – zu reduzieren (siehe Box 5.2). ULCOS will in seiner derzeitigen Demophase Pilotanlagen errichten; mit der Errichtung von Produktionsanlagen rechnet man in 15 bis 20 Jahren.

Box 5.2: Das ULCOS Konsortium
Box 5.2: The ULCOS Consortium

ULCOS steht für Ultra-Low Carbon dioxide (CO2) Steelmaking. Es ist dies ein Konsortium von 48 europäischen Firmen und Organisationen aus 15 Staaten, die eine kooperative Forschungs- und Entwicklungsinitiative zur drastischen Reduktion der CO2-Emissionen aus der Stahlproduktion gestartet haben. Das Konsortium beinhaltet alle größeren EU-Stahlfirmen, Partner aus der E-Wirtschaft, Anlagenbauer, Forschungsinstitute und Universitäten. Die Initiative wird von der Europäischen Kommission unterstützt. Das Ziel von ULCOS ist es, die CO2-Emissionen um zumindest 50 % zu reduzieren. (www.ulcos.org von 13.1.2012; Übersetzung: Schnitzer)

Ende 2010 gab es in Österreich 46 industrielle Gießereibetriebe, das sind um 2 Betriebe weniger als 2009. Zurzeit ist keine Gießerei in Österreich in das Emissionshandelsregime integriert (Fachverband der Gießereiindustrie, 2011).

Vom Fachverband wurde in der Nachkriegszeit die Gründung eines Gießereiinstituts initiiert, das seitdem auch vom Fachverband unterstützt wird. Hier finden laufend Optimierungstätigkeiten für Unternehmen statt, wobei es sich sowohl um wissenschaftliche als auch um experimentelle Projekte handelt. Neue Verfahren und auch neue Produkte werden entwickelt, die zum Ziel haben, mit einem geringeren Materialeinsatz höhere Leistungen zu erreichen und somit eine Ressourcenschonung zu verwirklichen. Derzeit laufen keine Projekte, die speziell auf eine Erhöhung der Energieeffizienz ausgerichtet sind.

5.1.5 Minderung oder THG-Reduktion I: Emissionsminderung durch effektiveren Energieeinsatz

Energiebedarf der Produktionsgebäude

Gemäß der Einteilung des energetischen Endverbrauchs nach Energieträgern und Nutzenergiekategorien für Österreich

Box 5.3: Definition der Prozessintensivierung
Box 5.3: Definition of process intensification

Durch eine Prozessintensivierung werden gleichzeitig die Notwendigkeiten der Energieeinsparung, der CO_2-Emissionsreduktionen und einer gesteigerten Wettbewerbsfähigkeit angesprochen. Die potenziell erreichbaren Vorteile dabei wurden als signifikant identifiziert. (Ministry of Economic Affairs, 2008; Übersetzung: Schnitzer)

(Statistik Austria, 2008) entfallen 18 % des thermischen Energiebedarfs der Industrie auf die Kategorie „Raumheizung und Klimatisierung". Die OIB-Richtlinie 6 (OIB, 2011) gilt auch für Produktions- und Lagergebäude, wenn nicht „der überwiegende Anteil der Energie für die Raumheizung und Raumkühlung jeweils durch Abwärme abgedeckt wird, die unmittelbar im Gebäude entsteht". Somit ist sichergestellt, dass zumindest neue Produktionsgebäude auch einen hohen wärmetechnischen Standard erzielen. Da Produktions- und Lagergebäude im Allgemeinen eine niedrigere Raumtemperatur benötigen als Büro- und Wohngebäude, ist eine energetische Sanierung einfach. Viele Industriebauten sind in Österreich sehr alt oder mit einem geringen wärmetechnischen Standard erbaut. Sanierungen scheitern heute oftmals an zusätzlichen Auflagen und neuen Gesetzen, die bei Maßnahmen zu tragen kommen. Manche Hallen weisen für die heutigen Anforderungen eine zu geringe Traglast für Schneelasten auf, weshalb eine Isolierung ohne Änderung der Statik nicht möglich ist.

Produktionsbetriebe weisen durch Produktions- und Produktumstellungen heute wesentlich geringere innere Wärmeentwicklung aus den Maschinen auf als früher, sodass die Heizung an Bedeutung gewinnt. Da aber alle Betriebe Elektrizität benötigen, sind Wärme-Kraft-Kopplungen auch für den Heizungsbereich anzudenken (siehe unten bei Wärme-Kraft-Kopplungen). Außerdem sind solare Systeme bei den geforderten niedrigen Temperaturen interessant (Jähnig und Weiß, 2007).

Prozessintensivierung, Wärmerückgewinnung und Prozessintegration

Prozessverbesserungen durch Optimierungen bei bestehenden Produktionsverfahren sowie durch Technologieänderungen betreffen den Energieverbrauch wie auch die Rohstoffnutzung. Einerseits kommt es durch kontinuierliche Veränderungen im Rahmen von regelmäßigen Wartungen und Maschinenaustausch zu Verbesserungen der Energie- und Rohstoffnutzung, andererseits ist aber ein großes Verbesserungspotenzial nur durch Technologieumstellungen zu erwarten. Dies können Neustrukturierungen im Rahmen von Ersatzinvestitionen sein oder Restrukturierungen der Gesamtprozesse.

Die Nutzung prozessinterner Ressourcen, energetisch sowie stofflich (Energiekaskaden, Kreislaufschließungen), stellt ein wichtiges Potenzial dar, große Emissionsminderungen sind aber hauptsächlich durch neue Technologien zu erwarten.

Energieeffiziente Antriebe

Gemäß NEA 2008 (Statistik Austria, 2009a) entfallen 22 % des Energiebedarfs der Produktion auf die Kategorie Standmotoren. Diese Aggregate haben eine kurze Lebensdauer und unterliegen dem regelmäßigen Austausch im Zuge von Wartungsarbeiten und Ersatzinvestitionen. Darüber hinaus sind Energieeinsparungen durch eine verbesserte Regelungstechnik im System möglich.

Der Fachverband der Elektro- und Elektronikindustrie schätzt das Einsparungspotenzial durch eine Modernisierung von Motoren auf über 3000 GWh/Jahr (FEI, 2009), der Großteil fällt dabei auf Druckluftsysteme, Ventilatoren und Pumpen (Abbildung 5.9).

Effizienzerhöhung bei der Energieumwandlung, Wärme-Kraft-Kopplung und Abwärmenutzung

Das Potenzial von Wärme-Kraft-Kopplungen zur effizienten, gekoppelten Herstellung von Wärme und Kraft wird derzeit in Europa nicht ausgenutzt. Die Europäische Union formuliert hierzu in ihrer Richtlinie 2004/8/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11.2.2004 über die Förderung einer am Nutzwärmebedarf orientierten Kraft-Wärme-Kopplung 2004 (Europäische Union, 2004) eine klare Meinung (siehe Box 5.4).

In allen Produktionsbetrieben wird Wärme und Kraft (elektrischer Strom) benötigt. Die Installation von Wärme-Kraft-Kopplungen (WKK) bietet sich daher aus energietechnischen Überlegungen an. Im industriellen Bereich werden diese An-

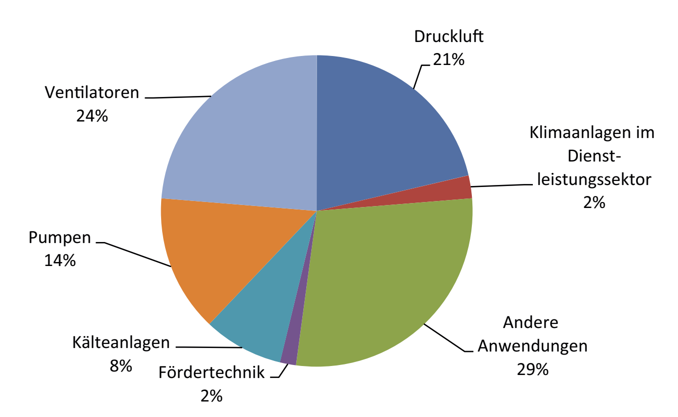


Abbildung 5.9 Abschätzung des Einsparpotenzials bei Motorensystemen in Österreich in GWh und % des Gesamtverbrauchs. Quelle: FEI (2009)

Figure 5.9 Estimation of possible energy savings with electrical drives in Austria in GWh and % of the present consumption. Source: FEI (2009)

lagen im Allgemeinen wärmegeführt gefahren, da mit dem Stromnetz ein Ausgleich besteht; im Gegensatz dazu werden Kraftwerksanlagen meist stromgeführt betrieben (KWK) und die Abwärme so weit möglich verkauft.

Aus der Studie von E-Bridge Consulting aus dem Jahre 2005 ergibt sich das in Tabelle 5.2 dargestellte Potenzial von KWK.

Für Deutschland wird das industrielle Potenzial für Strom und Wärme aus Wärme-Kraft-Kopplungen mit jeweils 90 TWh bei einem Investitionsbedarf von 15 Mrd. € geschätzt (Eikmeier et al., 2005). Für Österreich kann man mit ca. einem Zehntel dieses Wertes rechnen.

Das Potenzial für extern nutzbare industrielle Abwärme wird in Österreich auf 4,1 PJ für das Jahr 2020 und auf maximal 12 PJ im Jahr 2050 geschätzt (Christian et al., 2011). Hierzu laufen 2012 weitere Untersuchungen in Oberösterreich, der Steiermark und durch die Kommunalkredit Public Consulting. Für die innerbetrieblich nutzbare Abwärme gibt es keine systematische Erfassung in Österreich, das Potenzial ist aber vermutlich ein Mehrfaches der extern nutzbaren Mengen.

Bei allen Hochtemperaturprozessen besteht grundsätzlich die Möglichkeit, Abwärme mittels ORC-Prozessen in elektrische Energie umzuformen. Elektrizität wird in allen Betrieben benötigt und kann im Netz untergebracht werden. Das Potenzial über alle Sektoren hinweg ist nicht bekannt.

Wärmepumpen zur Rückgewinnung von Abwärme aus dem Niedertemperaturbereich sind dort sinnvoll, wo keine WKK vorhanden ist und große Energiemengen auf einem relativ geringem Niveau (< 100 °C) benötigt werden.

Box 5.4: Stellungnahme der Europäischen Union zur Kraft-Wärme-Kopplung

Box 5.4: Statement of the European Union to the cogeneration of heat and power

Das Potenzial der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) als Mittel zur Energieeinsparung wird derzeit in der Gemeinschaft nicht voll genutzt. Die Förderung einer am Nutzwärmebedarf orientierten, hocheffizienten KWK ist eine Priorität der Gemeinschaft, angesichts des potenziellen Nutzens der KWK für die Einsparung von Primärenergie, die Vermeidung von Netzwerkverlusten und die Verringerung von Emissionen, insbesondere von Treibhausgasemissionen. Ferner kann eine effiziente Nutzung der in KWK produzierten Energie auch zur Energieversorgungssicherheit und Wettbewerbsfähigkeit der Europäischen Union und ihrer Mitgliedstaaten beitragen. Daher ist es notwendig, Maßnahmen für eine bessere Ausschöpfung dieses Potenzials im Rahmen des Energiebinnenmarktes zu ergreifen. (Europäische Union, 2004)

Tabelle 5.2 Technisches Potenzial von Wärme-Kraft-Kopplungen in Österreich. Quelle: E-Bridge Consulting (2005)

Table 5.2 Technical potential von cogeneration units in Austria. Source: E-Bridge consulting (2005)

2002: Technisches dezentrales KWK-Potential	Nutzwärme			
	Raumheizung, Klima, Warmwasser	Dampferzeugung	Industrieöfen	Summe
	MW el	MW el	MW el	MW el
Land- und Forstwirtschaft	72	0	0	72
produzierender Bereich	1 197	2 464	223	3 884
Dienstleistung und öffentlicher Bereich	1 522	91	237	1 850
Haushalte	2 694	0	0	2 694
Gesamt	5 485	2 555	460	8 500

5.1.6 Minderung oder THG-Reduktion II: Emissionsminderung durch Brennstoffwechsel und den Einsatz erneuerbarer Energieträger

Substitution von fossilen Energieträgern mit hohen Emissionsfaktoren

Die Ziele Österreichs für den erweiterten Einsatz erneuerbarer Energie wurde im „Nationalen Aktionsplan 2010 für erneuerbare Energie für Österreich“ (BMWFJ, 2010) ausführlich dargestellt.

Der Brennstoffwechsel innerhalb der fossilen Energieträger (Kohle, Öl, Gas) ist in Österreich weitgehend abgeschlossen. Aus Abbildung 5.2 ist ersichtlich, dass sich bei den Einsatzmengen für Kohle und Öl in den letzten 10 Jahren sehr wenig geändert hat. Folglich wird es in naher Zukunft nur mehr zu wenigen Neuanschlüssen von Industriebetrieben an eine Gasversorgung kommen. Im Bereich der Eisen- und Stahlproduktion kam es in den vergangenen Jahren zu keiner Reduktion des Verbrauchs an Kohle und es wird auch bis 2020 kein Rückgang erwartet, da Kohle prozessbedingt eingesetzt wird. Der Einsatz von Holzkohle und torrefiziertem Holz ist möglich (Arnsfeld et al., 2012) und wird in einigen Unternehmen bereits versucht. Eine Potenzialabschätzung für diesen Substitutionsvorgang ist nicht verfügbar, aber es wird vermutlich bei Einzelfällen bleiben, die österreichweit nicht ins Gewicht fallen.

Im Bauwesen wird der Verbrauch an Öl bis 2020 nicht reduziert; Öl wird zum Betrieb der Baumaschinen benötigt und es nicht anzunehmen, dass bis 2020 Aggregate mit alternativen Energieträgern angetrieben werden. Jedenfalls sind in dieser Richtung keine wissenschaftlichen Arbeiten bekannt.

Einsatz von Biomasse

Feste Biomasse aus Land- bzw. Forstwirtschaft bzw. aus biogenen Abfällen kann grundsätzlich auch in der Industrie in geeigneten Kesselanlagen als Brennstoff eingesetzt werden und fossile Brennstoffe ersetzen. Hierdurch kommt es zwar zu keiner Verringerung des Energieverbrauchs, aber zu reduzierten Emissionen an Treibhausgasen.

Tatsächlich wird der Einsatz von Biomasse weiterhin nur in wenigen Industriesparten erfolgen (z. B. Zellstoffwerke, Holzverarbeitung etc.), wo Abfallbiomasse zur Verfügung steht oder eine große Nähe zur Forst- oder Landwirtschaft besteht, und stellt kein wesentliches Potenzial dar, da die Durchdringung bereits heute weitgehend erfolgt ist. Die Umstellung von Gaskessel auf Biomasse erfordert nicht nur eine völlige Neuinstallation im Kesselhaus, sondern auch eine neue Brennstofflogistik. An der Forderung nach einer regelmäßigen (täglichen?) Anlieferung von Biomasse scheitern mache Umstellungsvorhaben. (Abfall-)Biomasse kann auch in Drehrohröfen (z. B. in der Zementindustrie und beim Kalkbrennen in der Zellstoffindustrie) als Ölersatz verwendet werden (Ekebro, 2011).

Ein höherer Anteil an Biomasse in Feuerungsanlagen könnte durch eine Torrefizierung erreicht werden (Beekes und Cremers, 2012). Torrefizierte Biomasse hat auch das Potenzial, als technologischer Kohlenstoffträger (z. B. in der Stahlindustrie) eingesetzt zu werden.

Feuchte Biomasse – wie sie z. B. in der Landwirtschaft und der Lebensmittelindustrie anfällt – kann über Biogasanlagen zu Methan umgewandelt werden und nachfolgend zu jeglichen Heizzwecken und auch für Traktionsanwendungen eingesetzt werden.

Box 5.5: Verfahrensbeschreibung Torrefizierung
Box 5.5: Technology of torreficiation

Torrefizierung ist eine Methode zum Cracken von Biomasse. In einer sauerstoffarmen oder -freien Atmosphäre wird Biomasse für ca. eine Stunde auf 260–320 °C erhitzt. Hierbei wird Hemizellulose und teilweise Lignin und Zellulose desintegriert und hierdurch die Faserstruktur aufgelöst bzw. zerbrochen. Somit wird die Biomasse mahlfähig und sie kann mit Kohle gemeinsam verarbeitet werden.

Der erhaltene Heizwert liegt wegen des Verlustes an Feuchtigkeit und flüchtigen Bestandteilen zwischen 12 und 24 MJ / kg. Eine Zusatzfeuerung von bis zu 50 % Biomasse ist somit ohne große Änderungen der Feuerungstechnik möglich. (Beekes und Cremers, 2012; Übersetzung: Schnitzer)

Solare Wärme

Solare Prozesswärme kann nach verschiedensten Studie in Europa wesentlich zur Wärmeversorgung in der Industrie beitragen. Da rund 30 % des industriellen Wärmebedarfs unter 100 °C und 47 % unter 400 °C bestehen kann von einem stark steigenden Markt ausgegangen werden. Hierzu wird derzeit die Entwicklung von Hochtemperaturkollektoren vorangetrieben.

Für Österreich wurde das Potenzial im Projekt PROMISE mit 5,4 PJ / Jahr errechnet (Müller et al., 2004). Geht man

davon aus, dass 10 % dieses Potenzials bis 2020 realisiert werden, könnten bis dahin 3–4 % des industriellen Wärmebedarfs durch Solarthermie gedeckt werden. Unter diesen Annahmen besteht ein Marktvolumen von 1 000 MWth / Jahr entsprechend ca. 1 500 000 m².

Die solare Prozesswärme steht derzeit am Anfang ihrer Entwicklung. Derzeit gibt es weniger als 100 in Betrieb befindliche Anlagen weltweit (Stand 2009) mit einer Kapazität von 24 MWth (34 000 m²). Die meisten dieser Anlagen sind Pilotanlagen und relativ klein.

Die potenzialträchtigen Sparten sind die Lebens- und Genussmittelindustrie, der Fahrzeug- und Maschinenbau, die Textilindustrie und die Papierverarbeitung. Hier beträgt der Anteil an Niedertemperaturprozessen rund 60 %.

Ein besonderes Potenzial besteht bei der Beheizung von Industrie- und Lagerhallen, da hier niedrige Temperaturen (< 20 °C) gefragt sind.

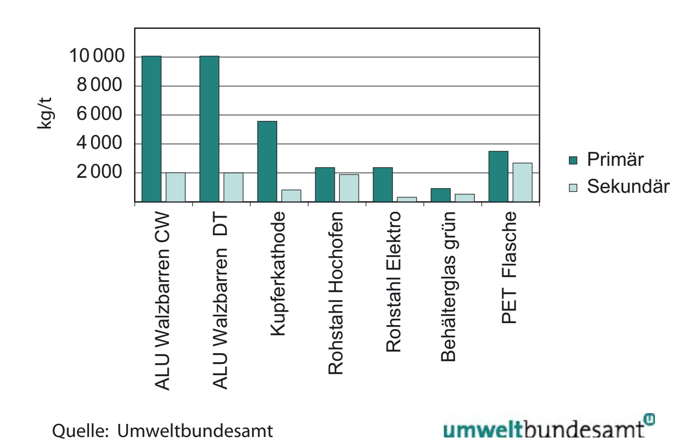


Abbildung 5.10 Spezifische THG-Emissionen bei der Primär- und Sekundärproduktion marktfähiger Zwischenprodukte (in kg / t). Quelle: Frischenschlager et al. (2010)

Figure 5.10 Specific greenhouse gas emissions at the production of semi-finished goods in the steel industry in kg / t. Source: Frischenschlager et al. (2010)

Verwendung rezyklierter Materialien als Rohstoff

Eine wesentliche Möglichkeit, bei der Herstellung von Produkten über deren Lebenszyklus Energie zu sparen, ist die Verwendung von Sekundärrohstoffen. Diese kommen aus Rückständen bei Verarbeitungsprozessen oder von den Endkonsumenten. Die wichtigsten als Sekundärrohstoffe einsetzbaren Materialien sind:

- Glas
- Papier
- Metalle (Eisen, Aluminium, Kupfer, Blei, Gold in Elektronikschrott etc.)
- Bauschutt
- Asphalt
- Kunststoffe
- Mineralstoffe (Stickstoff, Phosphor etc.)
- Verpackungsmaterialien, Tonerkartuschen
- …

Das Umweltbundesamt veröffentlichte 2010 eine Studie zur Klimarelevanz ausgewählter Recycling-Prozesse in Österreich (Frischenschlager et al., 2010), in welcher die Klimarelevanz des Einsatzes von Sekundärrohstoffen quantifiziert wird (Abbildung 5.10). Man sieht die Bedeutung dieses Ansatzes besonders bei Aluminium und Kupfer.

Je nach betrachtetem Zwischenprodukt werden unterschiedliche Mengen an Sekundärrohstoffen eingesetzt, eine Erhöhung ihrer Anteile wäre nur zum Teil möglich. Aufgrund der bereits bestehenden hohen Sekundärrohstoffzugaben und der Tatsache, dass ein hoher Anteil an Sekundärrohstoffen (insbesondere Metalle) weltweit gehandelt wird, ist davon auszugehen, dass zusätzliche, durch die österreichische Abfallwirtschaft gesammelt Mengen Mengen ersetzen würden, die derzeit am Weltmarkt zugekauft werden; BMLFUW und BMWFJ, 2011).

Unter dem Begriff „Urban Mining" erkennt man in Zeiten knapper werdender Rohstoffe ein steigendes Interesse an der Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen im urbanen Bereich (Brunner, 2011). „Urban Mining" könnte weitere Altstoffe in den Wirtschaftskreislauf bringen.

Einen ähnlichen Ansatz bietet „Landfill Mining", die Nutzung von Altdeponien als Rohstofflager. Ausgehend von einer Initiative des Landes Steiermark, A 14 Wasserwirtschaft, Ressourcen und Nachhaltigkeit, wurde ECO WORLD STYRIA 2012 beauftragt, ein Pilot-Projekt zu konzipieren, das nun über die BRIDGE-Förderschiene reif zum Start ist. Das Projekt soll grundlegende Erkenntnisse über das „Mining" von Deponien in ganz Österreich liefern, um darauf aufbauend weiterführende Forschungsarbeiten für zukünftige Deponierückbaukonzepte und -projekte, Aufbereitungs- und Sortiertechnologien und Verfahren für die Sekundärrohstoffindustrie zu starten. Fragestellungen in Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit des Rückbaus, den Wertstoffgehalt der Deponie als auch das Einbeziehen gesetzlicher Rahmenbedingungen sollen während der 3-jährigen Projektlaufzeit beantwortet werden. Neben der Entwicklung theoretischer Modelle werden darüber hinaus In-Situ-Versuchsreihen bei ausgewählten Deponien

Box 5.6: Das Konzept zu „Urban Mining“
Box 5.6: The concept of „urban mining“

„Urban Mining ist ein Konzept zur Rückgewinnung von Rohstoffen, das den gesamten Kreislauf von Produkten aller Größenordnungen berücksichtigt. Das reicht von normalen Verpackungen und kleinen Elektrogeräten – den sogenannten kurzfristigen urbanen Minen – bis hin zu großen Infrastrukturen und Gebäuden, den langfristigen urbanen Minen.“ (http://urban-mining.com/, abgefragt am 30.3.2013).

durchgeführt um fundierte Daten zu erhalten. In weiterer Folge sollen die Projekterkenntnisse die ersten Erfahrungen für die Ausarbeitung der zukünftigen normativen Rückbaustrategien und Standards sowie Ansätze zur Qualitätssicherung der gewonnen Wert- und Energiestoffe liefern (Eco World Styria, 2012).

Ecodesign und nachhaltige Produktgestaltung

Die Geschwindigkeit des Materialdurchsatzes durch das Wirtschaftssystem und damit auch dessen Energieintensität wird wesentlich durch die Verwendungsdauer der Produkte bestimmt. Deren erhöhte Langlebigkeit und verbesserte Reparierbarkeit kann durch eine reduzierte Neuproduktion den Energie- und Ressourcenverbrauch des produzierenden Sektors wesentlich vermindern.

Eine Verlängerung der Produktlebensdauer kann jedoch dann kontraproduktiv sein, wenn es bei Produkten, die durch hohe Energieverbräuche in der Nutzungsphase gekennzeichnet sind, durch Innovationen während der Produktlebensdauer zu einer substantiellen Verringerung dieser Verbräuche oder zur Verminderung von Emissionen kommt (z. B. 3l-Auto, Reduzierung des Wasser- und Stromverbrauches im Elektrogerätebereich: Motoren, Geschirrspüler etc.). Im Detail sind hierzu Lebenszyklusanalysen erforderlich.

Carbon Capturing and Storage (CCS)

Die Europäische Kommission schreibt der Entfernung von CO_2 aus Rauchgasen und seine Speicherung eine große Bedeutung zu, um das Ziel, bis 2050 die THG-Emissionen auf 20 % zu reduzieren (Vergleichsbasis 1990), zu erreichen (European Commission, 2013).

In den nächsten Jahren ist von Technologien, die CO_2 aus Ab- und Rauchgasen entfernen und speichern, keine Emissionsminderung im Bereich Produktion zu erwarten. Die Probleme der Abtrennung und insbesondere der Endlagerung sind nicht hinreichend gelöst, als dass man eine großtechnologische Umsetzung erwarten könnte.

Ansätze, CO_2 in der Algenzucht zur Produktion von Biomasse zu verwenden, haben 2012 zu ersten Pilotanlagen geführt, eine Produktionsanlage, die eine wesentliche Beeinflussung der Treibhausgasbilanz ergibt, ist jedoch bis 2020 nicht zu erwarten.

5.1.7 Instrumente zur Emissionsminderung

Emission Trading System der Europäischen Union

Das Europäische Emissionshandelssystem (EU ETS) ist das wichtigste Klimaschutzinstrument der Europäischen Union. Das EU ETS auf Unternehmensebene ist ein marktwirtschaftliches Instrument, mit dem die CO_2-Emissionen der zur Teilnahme verpflichteten Betriebe der Energiewirtschaft und der energieintensiven Industrie zu den gesamtwirtschaftlich geringsten Kosten reduziert werden sollen. Seit 2012 nimmt auch der Luftverkehr am Emissionshandel teil.

Bereits 2003 wurde mit einer Richtlinie dieses System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten in der Gemeinschaft (Europäische Union, 2003) geschaffen, um auf kosteneffiziente Weise auf eine Verringerung von THG-Emissionen hinzuwirken. Diese Richtlinie wurde 2009 ergänzt (Europäische Union, 2009).

Die aus Österreich teilnehmenden Unternehmen kommen großteils aus den energieintensiven Branchen, die oben beschrieben wurden. Anfang 2013 lagen die Handelspreise sehr niedrig (< 5 €/t), zu gering um technologische Innovationen zu induzieren.

Österreichische Unternehmen im Emissionshandel

In Österreich sind ca. 200 energieintensive Industrieanlagen verpflichtet, am Emissionshandel teilzunehmen. Auch Österreichs Unternehmen haben eine große Menge an Überschusszertifikaten angehäuft: nur im Jahr 2008 überstiegen die Emissionen in Österreich die Allokation. Mit dem starken Produktionsrückgang in der Sachgütererzeugung im Zuge der Finanzmarkt- und Wirtschaftskrise der Jahre 2008 und 2009 nahmen auch die Emissionen in den Emissionshandelssektoren ab (WIFO, 2013). In allen Sektoren, mit Ausnahme der

Raffinerien und der Nahrungsmittelindustrie, ergab sich daher im Jahr 2009 ein Überschuss an Emissionszertifikaten. Auch in den Folgejahren lag die Zuteilung an Emissionszertifikaten über den Emissionen, wenngleich vor allem der Überschuss der güterproduzierenden Unternehmen merklich zurückging. Für 2012, das letzte Jahr der Kyoto-Periode, errechnet sich neuerlich ein hoher Allokationsüberschuss, der sogar jenen des Jahres 2009 übersteigt. Etwa 80 % des Zertifikate-Überschusses resultieren dabei aus dem Elektrizitätssektor. Über die gesamte Kyoto-Periode 2008 bis 2012 beträgt der kumulierte Zertifikatsüberschuss für Österreich 10 Mt CO_2 (WIFO, 2013). Diese Überschüsse können in den Folgejahren bis 2020 weiter verwendet werden. Zahlreichen Studien zufolge verwässern sie die Ziele und verringern die tatsächlichen Treibhausgasreduktionen.

In der derzeitigen zweiten Phase stehen EU-weit pro Jahr 2,08 Mrd. t CO_2 an Emissions-berechtigungen zur Verfügung[1]. Ab der zweiten Handelsperiode können die Unternehmen zur Abdeckung ihrer Emissionen in eingeschränktem Umfang auch Emissionsreduktionseinheiten aus Projekten in Drittländern verwenden (Österreich: max. 10 % pro Anlage, gemessen an der Zuteilung). Die Anzahl der erfassten Anlagen im Handelssystem wurde ebenfalls erhöht. Nach der zweiten Phase begann 2013 die dritte Phase, die 2020 ausläuft und in der das Emissionshandelssystem weiter verstärkt und restriktiver genutzt werden wird. Für die dritte Phase ergeben sich einige grundlegende Änderungen. Anstatt nationalen Zielen und der Zuteilung von Zertifikaten wurde ein EU-weites Ziel von −21 % CO_2-Emissionen auf Basis des Jahres 2005 festgelegt (Richtlinie 2009/29/EU: Europäiosche Union, 2009). Die Zertifikate werden mit Ausnahmen für energieintensive Industrien versteigert, nicht genutzte Zertifikate aus der zweiten Phase können in der dritten Phase genutzt werden (Richtlinie 2009/29/EC: Europäiosche Union, 2009).

Der Erfolg des Systems wird unterschiedlich bewertet: einerseits hat die Wirtschaftskrise und somit sinkende Emissionen sowie das große Angebot an billigen Emissionsreduktionseinheiten aus Projekten in Drittländern zu einem Überschuss an Zertifikaten und einem geringem CO_2-Preis geführt, andererseits konnte das System auch aktive Minderungsmaßnahmen und eine Bewusstseinsbildung erzielen (Laing et al., 2013). Moidl und Wahlmüller haben sich in einem von GLOBAL 2000 veröffentlichten Bericht mit dem Erfolg des ETS in Österreich auseinandergesetzt (Moidl und Wahlmüller, 2012).

[1] http://ec.europa.eu/clima/policies/ets/cap/index_en.htm

Umweltförderung Inland

Im Bereich der Umweltförderung im Inland richtet das BMLFUW seine Förderungspolitik auf den Schwerpunkt Klimaschutz. Ziel ist der Schutz der Umwelt durch Vermeidung oder Verringerung von Belastungen in Form von Luftverunreinigung, klimarelevanten Gasen, Lärm und Abfällen. Die meisten Projekte wurden bei den Förderschwerpunkten Biomasse (21 %), Solaranlagen (15 %) sowie bei den betrieblichen Energiesparmaßnahmen (13 %) bewilligt. Im Jahr 2010 kamen 93 % der Förderungsmittel klimarelevanten Maßnahmen zugute. Die Umsetzung der Projekte der Umweltförderung im Inland ermöglichte eine jährliche Reduktion von 359 502 t CO_2-Äq. Dies entspricht einer Gesamtreduktion von 6 981 152 t CO_2-Äq., bezogen auf die technische Nutzungsdauer der Anlagen, und stellt einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung des Kyoto-Ziels dar. Im Zentrum der klimarelevanten Maßnahmen stand die Förderung von erneuerbaren Energieträgern mit einem Förder-Barwert von 48,6 Mio. € und einem umweltrelevanten Investitionsvolumen von 298,2 Mio. € (BMLFUW, 2013).

Klimaschutzgesetz

Das 2011 beschlossene Klimaschutzgesetz verteilt Rechte und Pflichten in verbindlicher Form auf alle Verantwortungsträger in Bund und Ländern. Als konkrete Maßnahmen werden genannt (BgBl, 2011):

- Erhöhung der Energieeffizienz,
- stärkere Nutzung erneuerbarer Energieträger,
- Berücksichtigung des Klimaschutzes in der Raumplanung,
- Mobilitätsmanagement,
- Abfallvermeidung,
- Erweiterung natürlicher Kohlenstoffsenken und
- ökonomische Anreize für Klimaschutzmaßnahmen.

Auf Basis des Klimaschutzgesetzes sollen Bund und Länder künftig auch vereinbaren, wer im Fall der Überschreitung einzuhaltender Emissionslimits die Verantwortung zu tragen hat.

Energieeffizienzgesetz

Nach dem vorliegenden Entwurf zum Energieeffizienzgesetz haben endenergieverbrauchende Unternehmen in Österreich, abhängig von ihrer Größe und ihrem Energieverbrauch, Maß-

nahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz zu setzen und zu dokumentieren.

Große und mittelgroße Unternehmen haben entweder ein Energiemanagementsystem in Übereinstimmung mit der Norm EN 16001 oder der ISO 50001 oder ein Umweltmanagementsystem gemäß Art. 13 der Verordnung (EG) Nr. 1221/2009 über die freiwillige Teilnahme von Organisationen an einem Gemeinschaftssystem für Umweltmanagement und Umweltbetriebsprüfung, soweit damit auch sämtliche Anforderungen nach ISO 50001 erfüllt werden, einzuführen. Sie sind verpflichtet, dieses zu zertifizieren, die Einführung zu dokumentieren, das Energiemanagementsystem oder Umweltmanagementsystem zu verwirklichen und aufrechtzuerhalten oder in regelmäßigen Abständen, zumindest alle vier Jahre, ein Energieaudit durchzuführen sowie den Anwendungsbereich und die Grenzen ihres Managementsystems festzulegen und zu dokumentieren oder die Durchführung und Ergebnisse des Energieaudits zu dokumentieren.

Kleine Unternehmen sind, sofern sie keine der obigen Maßnahmen setzen, verpflichtet, eine Energieberatung durchzuführen, deren Durchführung und Ergebnisse zu dokumentieren, nach Möglichkeit den sich aus der Durchführung der Energieberatung ergebenden Anforderungen der Verbesserung ihrer Energieeffizienz zu entsprechen und die erforderlichen Effizienzmaßnahmen zu setzen. Der Zeitpunkt der erforderlichen Beratung und weitere notwendige Schritte sind z.T. von der Betriebsgröße abhängig. Unternehmen, die weniger als 5 Personen beschäftigen oder deren Jahresumsatz oder deren Jahresbilanz 1 Mio. € nicht übersteigt, sind von den Verpflichtungen dieser Bestimmung ausgenommen.

Das Bundes-Energieeffizienzgesetz, mit dem das von der EU vorgegebene Energiesparziel von 1,5 % pro Jahr umgesetzt werden soll, ist 2012 vom Wirtschaftsminister in Begutachtung geschickt worden. In die Pflicht genommen werden Energielieferanten und Unternehmen, wobei energieintensive Unternehmen weniger stark beitragen müssen. Gelten sollen die neuen Bestimmungen per 1. Jänner 2014.

5.1.8 Projektionen

Die EU-Kommission hat vor kurzem innerhalb der Strategie „Europa 2020“ eine Leitinitiative für ein ressourcenschonendes Europa vorgeschlagen. Innerhalb dieses Rahmens legt sie nun eine Reihe langfristiger politischer Pläne in Bereichen wie Verkehr, Energie und Klimawandel auf. Diese Mitteilung enthält die Hauptelemente, die die Klimapolitik der EU gestalten und der EU helfen sollen, bis 2050 eine wettbewerbsfähige CO_2-arme Wirtschaft zu werden.

Die Untersuchung der Kommission hat sich auch mit den Wegen für Schlüsselsektoren befasst. Sie betrachtete eine Reihe von Szenarien mit verschiedenen Innovationsraten auf technologischem Gebiet und unterschiedlichen Preisen für fossile Brennstoffe. Die Ergebnisse der Szenarien waren weitgehend konvergent in Bezug auf den Umfang, in dem jeder Sektor bis 2030 und bis 2050 seine Emissionen senken muss. Dies ist an den Spannen in Tabelle 5.3 abzulesen (Europäische Kommission, 2011).

Aus der Analyse der Kommission wird deutlich, dass in der Industrie die THG-Emissionen bis 2050 um 83–87 % verringert werden könnten. Fortschrittlichere, ressourcenschonende und energieeffiziente Industrieprozesse und -anlagen, mehr Recycling sowie Technologien zur Verringerung von Nicht-CO_2-Emissionen (z. B. Stickoxide und Methan) könnten einen wesentlichen Beitrag leisten, denn damit könnten energieintensive Sektoren ihre Emissionen um mindestens die Hälfte reduzieren. Da Lösungen sektorspezifisch sind, hält die Kommission es für notwendig, zusammen mit den betreffenden Sektoren spezifische Fahrpläne aufzustellen.

Tabelle 5.3 Prozentuelle Emissionssenkungen einzelner Sektoren. Quelle: Europäische Kommission (2011)
Table 5.3 Relative reduction of GHGs in selected sectors. Source: European Commission (2011)

THG-Emissionsverringerung gegenüber 1990	2005	2030	2050
Insgesamt	–7 %	–40 bis –44 %	–79 bis –82 %
Sektoren			
Stromerzeugung (CO_2)	–7 %	–54 bis –68 %	–93 bis –99 %
Industrie (CO_2)	–20 %	–34 bis –40 %	–83 bis –87 %
Verkehr (einschl. CO_2 aus der Luftfahrt, ohne Seeverkehr)	+30 %	+20 bis –9 %	–54 bis –67 %
Wohnen und Dienstleistungen (CO_2)	–12 %	–37 bis –53 %	–88 bis –91 %
Landwirtschaft (Nicht-CO_2)	–20 %	–36 bis –37 %	–42 bis –49 %
Andere Nicht-CO_2-Emissionen	–30 %	–72 bis –73 %	–70 bis –78 %

Die „European Climate Foundation" weist in ihrer Studie „Roadmap 2050" darauf hin, dass diese neuen Technologien allesamt wesentlich höhere Investitionen als die derzeitigen erfordern, dass aber die jährlichen Gesamtkosten für Energie geringer sein werden (European Climate Foundation, 2010).

In jedem Sektor werden die drei entscheidenden Strategien für den Übergang auf eine kohlenstoffarme Wirtschaft begangen werden müssen:

- Erhöhen der Effizienz und Effektivität des Energieeinsatzes,
- Übergang auf CO_2-neutrale Energieträger,
- Übergang auf nachwachsende Rohstoffe.

Der von der europäischen Politik erstrebte Übergang auf ein kohlenstoffarmes Wirtschafts- und Gesellschaftssystem wird jedenfalls nicht ohne große Umstellungen bei Produktion und Konsumation möglich sein. Rifkin (2011) nennt das „Die dritte industrielle Revolution".

5.1.9 Forschung und Entwicklung: Bedarf, Potenzial

Eine Studie des WIFO lässt bis 2020 einen in etwa konstanten Ausstoß an Treibhausgasen aus der Produktion erwarten, da sich Effizienzmaßnahmen und allgemeine Wachstumsraten gegenseitig aufheben werden (Köppl et al., 2011). Auch ist bis 2020 keine wesentliche Änderung in der Struktur der Industrieproduktion zu erwarten.

Intensive Forschung und Entwicklung ist besonders für die energieintensive Industrie überlebenswichtig, da sonst im globalen Wettbewerb die Chancen immer schlechter werden. Hier sind grundsätzlich neue Ansätze erforderlich, während in den anderen, weniger energieintensiven Branchen durch die Anwendung des Standes der Technik noch Reduktionspotenziale genutzt werden können. Die Entwicklungen werden sich von Innovationen bei Maschinen und Apparaten auf Systeme und Verfahren verschieben müssen. Dies betrifft insbesondere Methoden zur Prozessintegration, wo neben der Einsparung von Ressourcen auch Anlagenteile verringert werden können (z. B. multifunktionelle Einheiten). Ein weiteres Potenzial bietet die Umstellung von Chargenverfahren auf eine kontinuierliche Betriebsweise. Besonders in der Lebensmittelindustrie bieten sich hier Effizienzpotenziale an.

Ein eigener Forschungsschwerpunkt sollte der prozesstechnisch bedingte Einsatz von Kohlenstoff (C) sein, wo ein Übergang zu biogenen Kohlenstoffquellen erst im Anfangsstadium steht. Gleiches gilt für andere verfahrensbedingte CO_2-Emissionen.

„Carbon Capturing" – die Rückgewinnung von Kohlenstoff aus Abgasen – ist besonders dann interessant und bedarf einer Forschungs- und Entwicklungs-Förderung, wenn der Kohlenstoff im Wirtschaftskreislauf gehalten werden kann und zur Rückgewinnung überschüssige, erneuerbare Energie eingesetzt wird.

Die laufenden Programme des BMVIT (Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie) und der FFG (Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft) zu neuen industriellen Prozessen bieten einen ausgezeichneten Ansatzpunkt für einige der erforderlichen Innovationen. Für die Zielerreichung von 83–87% Reduktion der THG-Emissionen werden sie aber nicht ausreichen. Entscheidend wird es sein, neben der Forschung auch die Umsetzung neuer Technologien in der industriellen Praxis zu fördern, indem Investitionsrisiken von der öffentlichen Hand übernommen werden.

5.2 Gebäude
5.2 Buildings

Gebäude verursachen 32 % des Endenergiebedarfs und ca. 40 % des Primärenergiebedarfs in den meisten der Internationalen Energieagentur angehörigen Ländern (IEA, 2014). Der Großteil der Energie wird in Mittel- und Nordeuropa für Raumheizung benötigt. Kleinere Anteile werden für Warmwasserbereitung und den Strombedarf im Gebäude aufgewendet. In hochwärmegedämmten Gebäuden kann der Strom- und Warmwasserbedarf den Heizenergiebedarf übersteigen.

5.2.1 Anzahl und Größe der Gebäude und Wohnungen

Basis für alle österreichischen Studien im Gebäudebereich bilden die Vollerhebung der Statistik Austria über die Anzahl an Gebäuden und Wohnungen (Statistik Austria, 2013a) und der Mikrozensus (Statistik Austria, 2013), welcher ein gleitendes statistisch relevantes Sample von Wohnungen umfasst und somit eine sehr gute Datenbasis für Wohngebäude geschaffen hat. Für Nichtwohngebäude gibt es eine erste Studie zur Ermittlung der Energieverbräuche in verschiedenen Gewerbesparten (Statistik Austria, 2011). Leider existiert darüber hinaus keine Erhebung der Nutzflächen von Nichtwohngebäuden. Daher beruht die Berechnung des Energiebedarfs und der THG-Emissionen auf Abschätzungen und Hochrechnungen.

Der Gebäudebereich ist durch eine stetige Zunahme der Anzahl der Gebäude und Wohnungen sowie der Nutzfläche gekennzeichnet. Dies ist zum einen auf die steigende Bevöl-

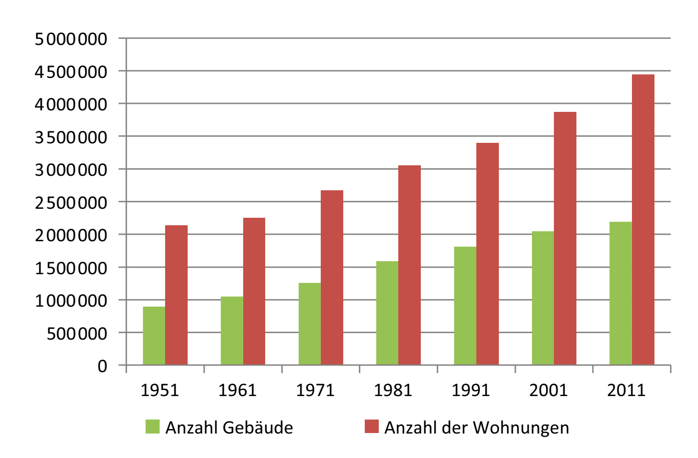


Abbildung 5.11 Anzahl der Gebäude und Wohnungen. Quelle: Statistik Austria (2013a)

Figure 5.11 Number of buildings and flats. Source: Statistik Austria (2013a)

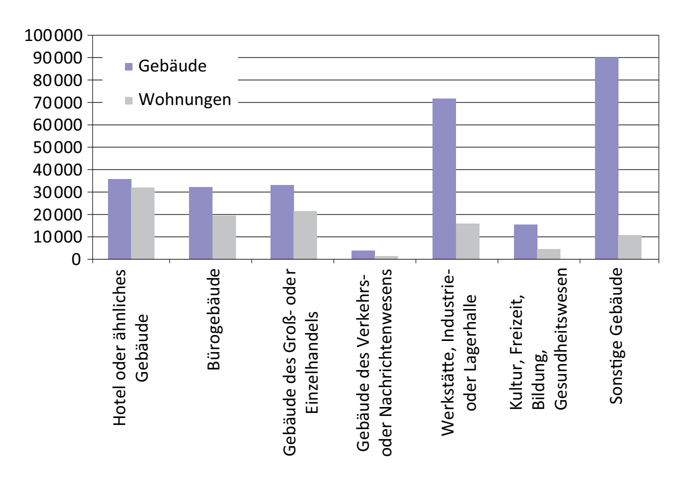


Abbildung 5.12 Anzahl der Gebäude und Wohnungen nach Art des (Wohn-)Gebäudes 2001. Quelle: Statistik Austria (2004)

Figure 5.12 Number of buildings and flats itemized by type of buildings 2001. Quelle: Statistik Austria (2004)

kerung in Österreich und zum anderen auf die größere Nutzfläche pro Person zurückzuführen. Im Jahr 2011 waren ca. 4,4 Mio. Wohnungen in 2,2 Mio. Gebäuden vorhanden (Abbildung 5.11).

Etwa drei Viertel aller Gebäude und 50 % der Wohnungen sind bzw. befinden sich in Ein- und Zweifamilienhäusern, 3 % der Wohnungen befinden sich in Nichtwohngebäuden. Allerdings bestehen Unsicherheiten bei der Definition von Wohn- und Nichtwohngebäuden sowie bei der Bilanzierung von Gebäuden mit gemischter Nutzung (Abbildung 5.12). Etwa 19 % der Nutzfläche wurde vor 1919, 7 % von 1919 bis 1944 und 44 % der Nutzfläche der Wohnungen wurde in den Jahren 1945 bis 1980 errichtet (Statistik Austria, 2004). Somit sind ca. 70 % der Wohnfläche mit energetisch schlechtem Baustandard errichtet und potenziell für eine energetische Sanierung geeignet.

5.2.2 Energieträger

Die Statistik Austria erhebt Zeitreihen des österreichischen Energiebedarfs. Der Gebäudebereich fällt in einigen Darstellungen in den Sektor „Sonstige Energieverbraucher", die sich in die folgenden Bereiche unterteilt:

- Private Haushalte
- Öffentliche und private Dienstleitungen
- Landwirtschaft

Der Energiebedarf der privaten Haushalte wird des Weiteren unterteilt in:

- Raumheizung
- Warmwasserbereitung
- Kochen
- Sonstiges (u. a. Strombedarf für Haushaltsgeräte)

Zudem sind Zeitreihen für den Brennstoffeinsatz für private Haushalte und erstmals auch eine Erhebung des Brennstoffeinsatzes für Dienstleistungsgebäude verfügbar (Statistik Austria, 2011).

Während der Endenergiebedarf für die Kategorie „Sonstiges" seit 1996 etwa bei 420 PJ / Jahr stagniert, steigt der Bedarf für Verkehr und produzierenden Bereich stark an.

Der Anteil der privaten Haushalte und privater und öffentlicher Dienstleister (ohne Landwirtschaft) sinkt stetig und liegt 2010 bei ca. 28 % des gesamten Endenergiebedarfs. Im Bereich der Sonstigen machen die privaten Haushalte mit circa 260 PJ / Jahr etwa 62 % und die privaten und öffentlichen Dienstleister mit 130 PJ etwa 31 % des Endenergiebedarfs aus. Im Bereich der Landwirtschaft liegt dieser Wert bei circa 7 %.

Trotz des Zubaus an Wohnfläche und Fläche für Nichtwohngebäude bleibt der Energiebedarf konstant. Damit halten sich der zusätzliche Energiebedarf durch Neubauten und die Energieeinsparung durch Abriss und Sanierung seit etwa 1996 die Waage.

Die weitere Unterteilung des Bereichs „Private Haushalte" in Verwendungszwecke zeigt Abbildung 5.13. Den Hauptteil macht die Raumheizung mit ca. 71 % (195 PJ / Jahr) aus, der Anteil der Warmwasserbereitung liegt bei circa 13 % (35 PJ / Jahr) und Kochen bei knapp 3 % (7 PJ / Jahr). Der Rest („Sonstiges", 37 PJ / Jahr) entspricht dem Haushaltsstrombedarf.

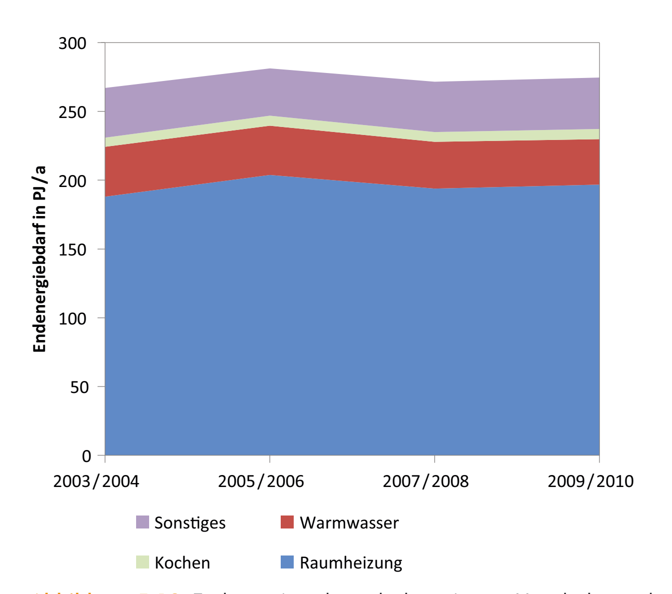


Abbildung 5.13 Endenergieverbrauch der privaten Haushalte nach Verwendungszweck in PJ / Jahr. Quelle: Statistik Austria (2012)

Figure 5.13 End use energy demand of private households by use in PJ / year. Source: Statistik Austria (2012)

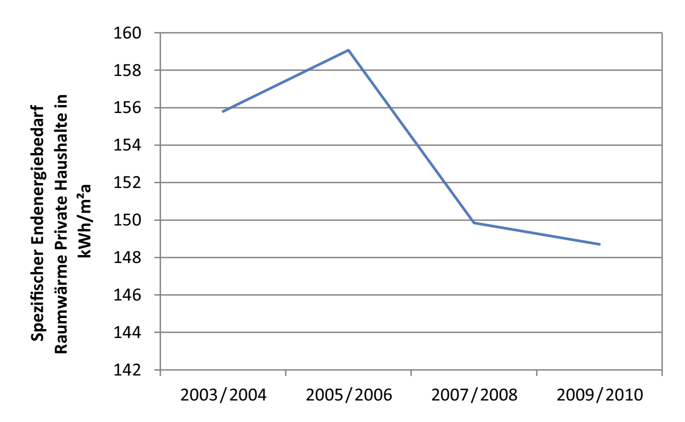


Abbildung 5.14 Endenergieverbrauch der privaten Haushalte für Raumwärmebedarf in kWh / m² / Jahr und Warmwasser in kWh / Person / Jahr. Quelle: Statistik Austria (2012)

Figure 5.14 Specific end use energy demand of private households for space heating in kWh / m² / year and domestic hot water demand in kWh / person / year. Source: Statistik Austria (2012)

Die Absolutwerte sind für die Zeit der Erhebung von 2003 bis 2010 in etwa konstant. Bezogen auf die m² ergeben sich aufgrund der Steigerung der konditionierten Fläche sowohl für die Raumwärme als auch für den Warmwasserbedarf fallende Tendenzen. So liegt der spezifische Endenergieverbrauch für Raumwärme im Mittel aller Gebäude 2009 / 2010 bei etwa 148 kWh / m² / Jahr. Für Warmwasserbereitung werden mit fallender Tendenz im Zeitraum 2009 / 2010 durchschnittlich 1 100 kWh / Person und Jahr benötigt (Abbildung 5.14).

Die Aufteilung der privaten Haushalte nach Energieträgern zeigt Abbildung 5.15. Etwa 20 % werden jeweils von den Energieträgern Holz, Gas, Heizöl und Strom aufgebracht. 10 % wird von der Fernwärme beigesteuert. Öl zeigt eine fallende, Fernwärme hingegen eine steigende Tendenz. Solarthermie und Wärmepumpen machen jeweils etwa 1,5 % des Endenergiebedarfs aus, zeigen aber eine steigende Tendenz.

Von 2003 bis 2010 hat sich der Anteil erneuerbarer Energieträger insgesamt von 22,9 auf 26,9 % und der Anteil der Fernwärme von 6,9 auf 9,9 % erhöht. Der Anteil von Heizöl hat sich im gleichen Zeitraum von 25 auf 19 % und der Anteil von Kohle von 0,5 auf 0,2 % reduziert. Der Anteil von Erdgas ist mit 20,5 % konstant geblieben. Es lässt sich also ein Trend von Heizöl hin zu erneuerbaren Energieträgern und Fernwärme feststellen, der wohl auch aufgrund der hohen Volatilität der Ölpreise und der Verfügbarkeit von technisch hoch entwickelten automatischen Heizungssystemen auf Basis erneuerbarer Energieträger zurückzuführen ist.

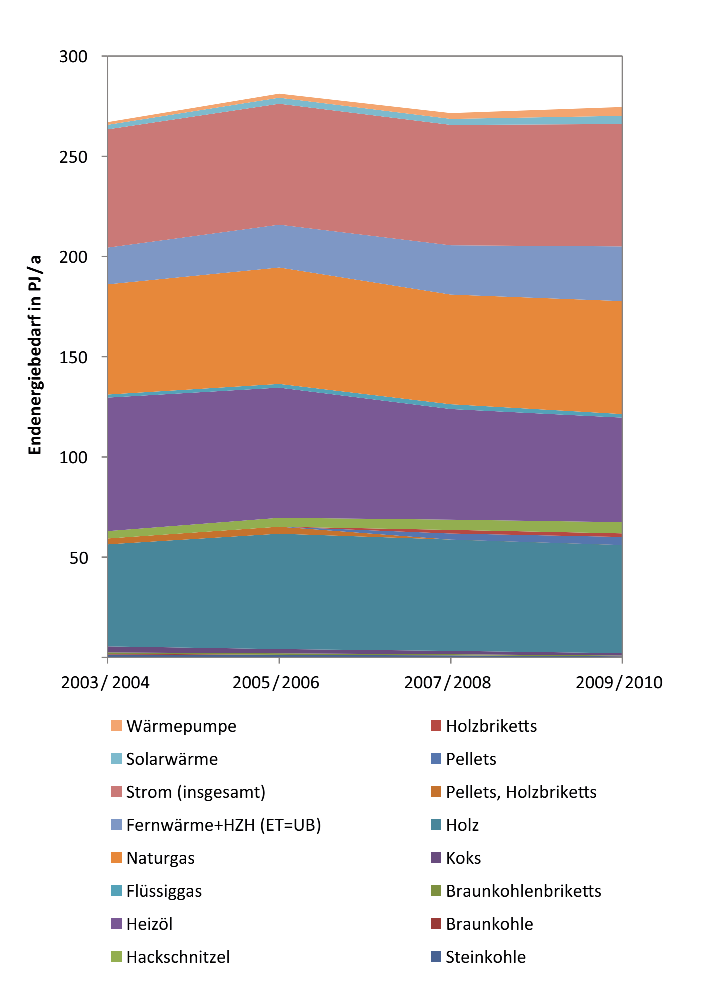


Abbildung 5.15 Endenergieverbrauch der Haushalte nach Energieträger in PJ / Jahr. Quelle: Statistik Austria (2012)

Figure 5.15 End use energy demand of private household by energy carrier in PJ / year. Source: Statistik Austria (2012)

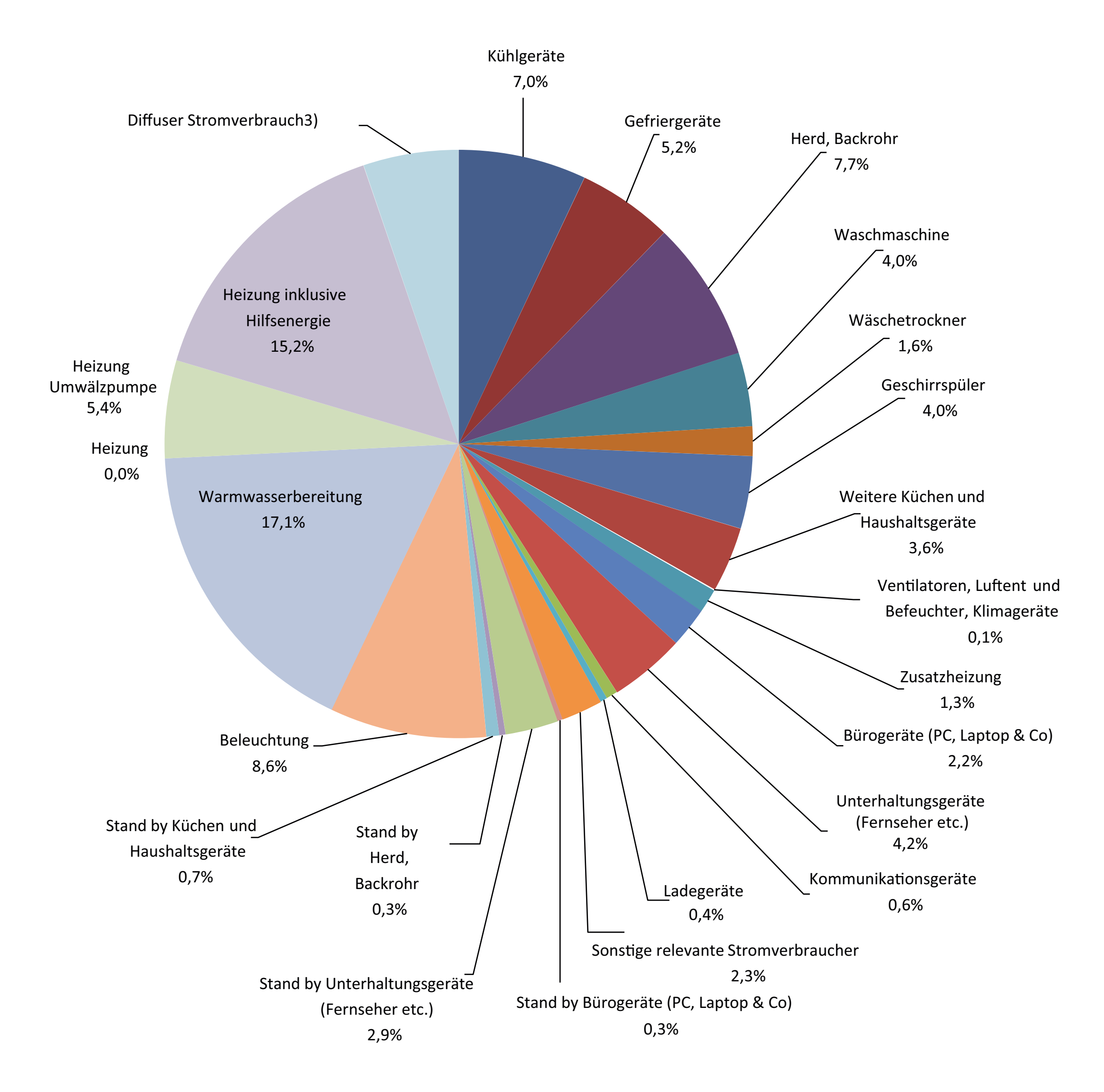


Abbildung 5.16 Anteil der Verbrauchskategorien am Stromverbrauch der Haushalte im Jahr 2008 in Prozent. Werte aus Statistik Austria (2009b)

Figure 5.16 Share of electric appliances on total electricity demand of private household in %. Source: Statistik Austria (2009b)

Eine genauere Analyse der Statistik Austria (2012) zeigt, dass der Bereich „Kochen“ zu 83 % mit Strom, 10 % mit Gas und 7 % mit Holz versorgt wird. „Sonstiges“ (Haushaltsstrom) wird zu 100 % mit Strom versorgt. Damit ergibt sich eine Verteilung nur für Raumheizung und Warmwasser für Holz, Gas und Heizöl mit jeweils ca. 27 %. Fernwärme liegt bei 14 % und Strom bei 9 %. Solarthermie und Wärmepumpen liegen bei jeweils knapp über 2 %.

Abbildung 5.16 zeigt die Verteilung des Strombedarfs der Haushalte. Primäre Stromverbraucher sind Heizung und Warmwasserbereitung mit in Summe 37,7 %. Weitere relevante Verbraucher wären etwa Kühl- und Gefriergeräte (12,2 %), Beleuchtung (8 %), Herd bzw. Backrohr (7,7 %).

Die Analyse des öffentlichen und privaten Dienstleistungssektors durch die Statistik Austria (2011) wird in Abbildung 5.17 dargestellt. Dies ist die erste detaillierte Erhebung, die im Nichtwohngebäudebereich in Österreich bisher durchgeführt wurde. Sie zeigt, dass in diesem Bereich hauptsächlich Strom (38 %), Fernwärme (23 %), Erdgas (20 %) und Heizöl (13 %) als Energiequellen herangezogen werden. Der Gesamtenergiebedarf wurde in dieser Studie mit 121 PJ / Jahr ermittelt. Biomasse macht nur 2,5 % aus. Weitere erneuerbare Energieträger sind nicht angegeben.

Die leitungsgebundenen Energieträger machen damit insgesamt über 80 % des energetischen Endverbrauchs im Dienstleistungssektor aus. Kohle, Diesel, Benzin und Flüssiggas sowie erneuerbare Energieträger und Abfälle spielen mit einem Anteil von 4,2 % hingegen auf gesamtsektoraler Ebene eine eher geringe Rolle. Der Anteil der biogenen Energieträger – dazu zählen Pellets, Hackschnitzel, Holzabfälle, Brennholz und sonstige Biogene Energieträger – beträgt rund 2,5 % (Statistik Austria, 2011).

Abbildung 5.18 zeigt darüber hinaus eine Aufgliederung des Endenergieverbrauchs in spezifischen Anwendungsbereichen. Im Dienstleistungssektor dominiert in der Regel der Energieeinsatz für Raumwärme, gefolgt vom Verbrauch von

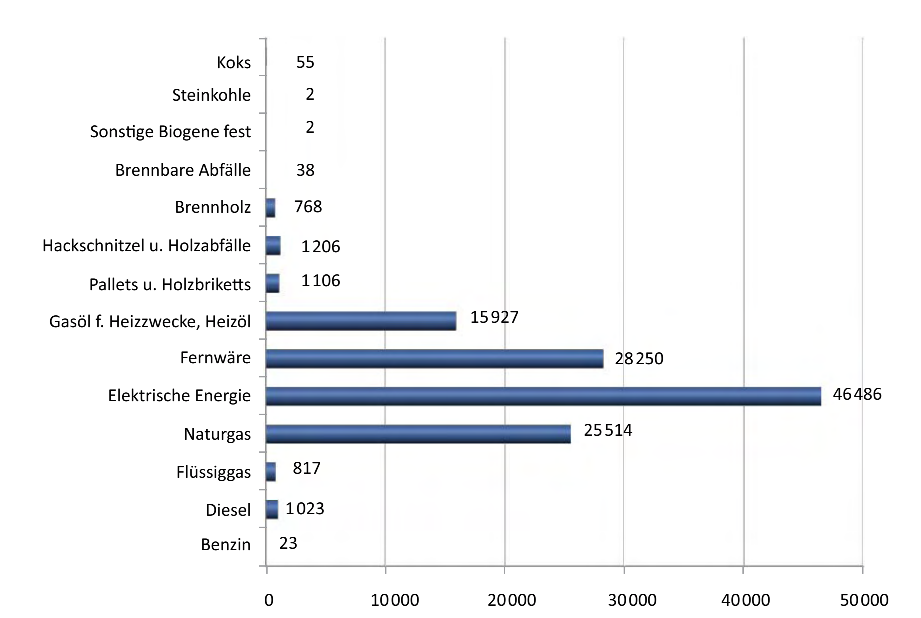


Abbildung 5.17 Endenergieverbrauch des Dienstleistungssektors in TJ/Jahr. Quelle: Statistik Austria (2011)

Figure 5.17 End use energy demand of the commercial sector in TJ/year. Source: Statistik Austria (2011)

elektrischer Energie für Beleuchtung, Klimatisierung, EDV und andere Informations- und Kommunikationstechniken, wie z. B. Kopierer, elektrische Klein-Geräte, wie z. B. Herde und Kühlschränke, und elektrische Großgeräte, wie z. B. Backöfen (Statistik Austria, 2011).

Nicht betrachtet wird im Rahmen des Berichts der verkehrsbedingte Verbrauch und die erzeugte Solar- und Umgebungswärme. Der Verkehr ist in den Energiebilanzen funktional definiert. Sein Verbrauch wird damit einem eigenen „Verkehrssektor" zugewiesen (Statistik Austria, 2011).

Nach ÖNACE 2008-Abschnitten (Statistik Austria 2014) wurde der Großteil der Energie im Handel (inklusive Instandhaltung und Reparatur von Kraftfahrzeugen) (23,4 %), in der Beherbergung und Gastronomie (19,0 %), in der öffentlichen Verwaltung, Verteidigung und Sozialversicherung (11,3 %) sowie im Gesundheits- und Sozialwesen (9,8 %) konsumiert. Auf der Ebene der ÖNACE-Abteilungen verbrauchten die öffentliche Verwaltung, Verteidigung und Sozialversicherung (11,3 %), die Beherbergung (11,6 %), der Einzel- (12,4 %) und Großhandel (8,5 %), das Gesundheitswesen (7,4 %) und die Gastronomie (7,4 %) zusammen fast 60 % der Energie.

Im Hinblick auf die Analyse der Energieverbrauchsstrukturen wurde zudem die Kategorie der „Büros" gebildet. Bürogebäude prägen heute große Teile unserer Umwelt und so finden sich Bürogebäude in nahezu allen Dienstleistungsbranchen. Die Kategorie der „Büros" umfasst daher ein breites Spektrum an ÖNACE-Abteilungen. In der Kategorie „Büros" sind alle Unternehmen berücksichtigt, deren Anzahl von Büroarbeitsplätzen im Vergleich zur Anzahl der Beschäftigten (selbstständig und unselbstständig) mehr als 80 % beträgt und die nicht der öffentlichen Verwaltung, Verteidigung und Sozialversicherung, der Beherbergung, dem Einzel- und Großhandel, dem Gesundheitswesen und der Gastronomie angehören. Der Anteil der „Büros" am Verbrauch im tertiären Sektor beträgt rund 11,2 % (Statistik Austria, 2011).

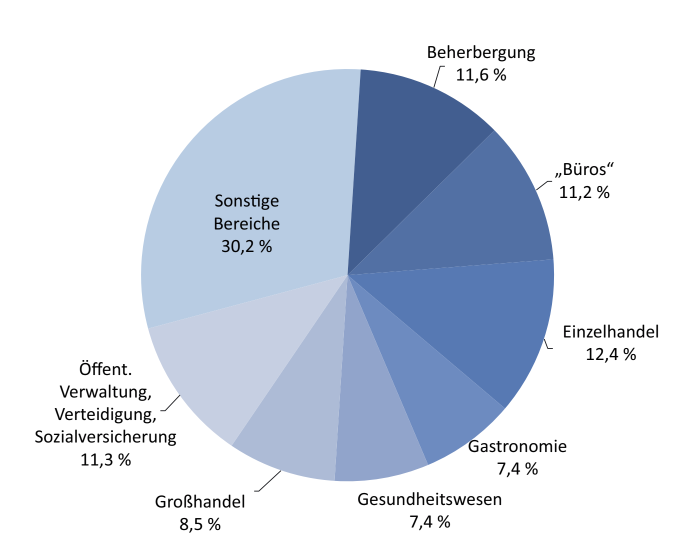


Abbildung 5.18 Anteil ausgewählter Bereiche am Endenergieverbrauch des Dienstleistungssektors in %. Quelle: Statistik Austria (2011)

Figure 5.18 Share of end-use energy demand of the commercial sector in %. Source: Statistik Austria (2011)

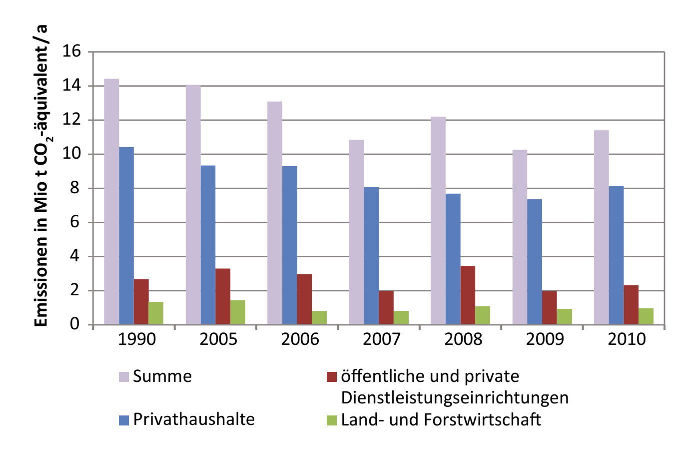


Abbildung 5.19 THG-Emissionen des Sektors Raumwärme und sonstiger Kleinverbrauch in Mt/Jahr CO_2-Äq. Quelle: Anderl et al. (2009, 2011, 2012)

Figure 5.19 Greenhouse gas emissions of the residential and other sector in million t/year CO_2-Eq. Source: Anderl et al. (2009, 2011, 2012)

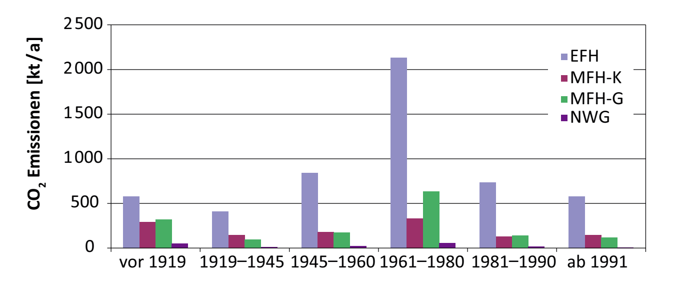


Abbildung 5.20 CO_2-Emissionen des Sektors „Raumwärme" in kt/Jahr aufgeschlüsselt nach Gebäudetyp und Baualter (EFH: Einfamilienhaus, MFH-K: Mehrfamilienhaus klein [≤ 10 Wohneinheiten], MFH-G: Mehrfamilienhaus groß [> 10 Wohneinheiten], NWG: Wohnungen in Nichtwohngebäuden). Quelle: Kletzan et al. (2006)

Figure 5.20 CO_2 emissions of residential space heating in kt/year for building types and building age (EFH: single family house, MFH-K: multifamily building small [≤ 10 flats], MFH-G: multifamily building large [> 10 flats], NWG: flats in non-residential buildings). Source: Kletzan et al. (2006)

5.2.3 THG-Emissionen im Gebäudebereich

Mit ca. 24 Mt/Jahr CO_2 betrug 2010 der Anteil der Haushalte an den CO_2-Emissionen Österreichs 25 %. Die CO_2-Emissionen aus biogenen Energieträgern bilanzieren gemäß internationaler Konvention CO_2-neutral, da der Kohlenstoff, der in die Atmosphäre abgegeben wurde, dieser zuvor entnommen wurde. Wird dies berücksichtigt, so reduzieren sich die CO_2-Emissionen auf 16 Mt und der Anteil auf ca. 23 % (Statistik Austria, 2012a). Sie verteilen sich etwa zur Hälfte auf Raumwärme sowie sonstigen Kleinverbrauch und zur anderen Hälfte auf Warmwasserbereitung und den Strombedarf.

Der Sektor „Raumwärme und sonstiger Kleinverbrauch" des Bereichs „Haushalte" trägt nach dem Klimaschutzbericht 2011 (Anderl et al., 2011) mit 14 % zu den österreichischen THG-Emissionen bei. Dieser Prozentsatz ist, verglichen mit dem Anteil von 28 % am Endenergiebedarf, vor allem aufgrund der verwendeten CO_2-emissionsarmen Energieträger (Biomasse und Fernwärme) wesentlich geringer. Eine weitere Ursache dafür ist, dass in der Emissionsdarstellung gemäß Klimaschutzbericht die Emissionen zur Fernwärme- und Stromerzeugung dem Sektor „Energieaufbringung" zugeordnet wird.

Abbildung 5.19 zeigt die österreichischen THG-Emissionen im Sektor „Raumwärme und sonstiger Kleinverbrauch" ausgewählter Jahre beginnend mit 1990. Die THG-Emissionen des Sektors zeigen bis 2009 eine fallende Tendenz, was zum einen mit dem stagnierenden Energiebedarf und zum anderen mit dem Energieträgerwechsel von Öl zu Fernwärme sowie erneuerbaren Energieträgern zu erklären ist. Die THG Emissionen lagen 2009 mit 10,3 Mt/Jahr CO_2-Äq. in etwa im Rahmen der österreichischen Zielvorgaben, die ursprünglich im Kyoto-Protokoll vorgenommen wurden (Lebensministerium 2002: 10,5 Mt/Jahr CO_2-Äq. für 2010). Im Jahr 2010 ist nach Anstieg des Endenergiebedarfs wieder ein Anstieg der THG-Emissionen gegenüber 2009 auf 11,4 Mt/Jahr CO_2-Äq. zu verzeichnen. Allerdings sind kurzfristige Jahr-zu-Jahr-Variationen vor allem witterungsbedingt. Steigt die Zahl der Heizgradtage, steigen Energiebedarf und THG-Emissionen. In den Jahren 2009 und 2010 lagen die THG-Emissionen unter den Werten der 2007 angepassten Klimastrategie von 11,9 Mt/Jahr CO_2-Äq. für 2010 (Lebensministerium, 2007). Ebenfalls im Mittel 11,9 Mt/Jahr CO_2-Äq. werden im Klimaschutzgesetz (2014) für die Jahre 2008 bis 2012 vorgegeben. Somit wurde im Klimaschutzgesetz der Status Quo fortgeschrieben. Bis 2020 sollen diese Emissionen auf 8,65 Mt/Jahr CO_2-Äq. fallen.

Deutlich ist in Abbildung 5.20 das Absinken der Emissionen der privaten Haushalte zu sehen, was vor allem auf einen Energieträgerwechsel im Mehrfamilienhausbereich hin zur Fernwärme erklärbar ist. Dieser Bereich verursacht etwa zwei Drittel der THG-Emissionen des gesamten Sektors. Öffentliche und private Dienstleistungen liegen konstant bei etwa einem Viertel der CO_2-Emissionen und die Land- und Forstwirtschaft (die in dieser Darstellung auch die land- und forstwirtschaftlichen Maschinen und Geräte inkludiert) liegt konstant bei 9 %.

Im Folgenden wird eine Regionalisierung der Treibhausgas-Emissionen aus dem Bereich Raumwärme durchgeführt.

Die höchsten CO_2-Emissionen entstehen bei Einfamilienhäusern aufgrund des geringen Volumen-zu-Oberflächen-

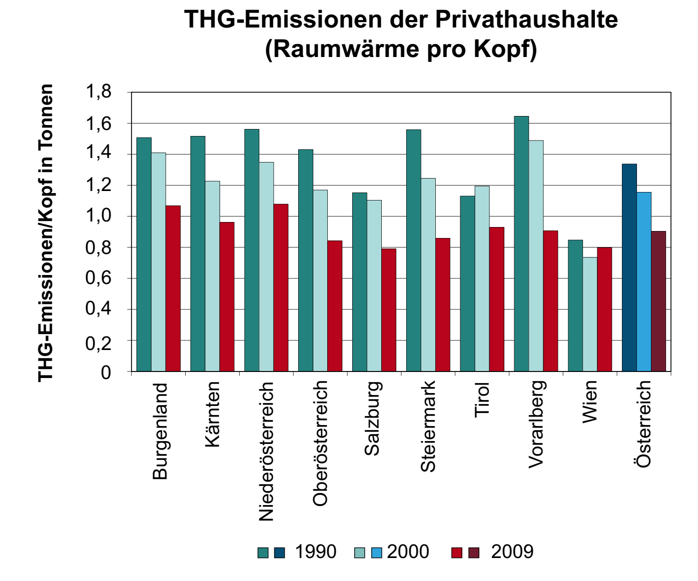


Abbildung 5.21 THG-Emissionen der privaten Haushalte in t/Kopf,/Jahr für 1990–2009 aufgeschlüsselt nach Bundesländern. Quelle: Anderl et al. (2012)

Figure 5.21 CO_2-eq. emissions of private households in t/person/year from 1990 to 2009 for Austria and the Austrian provinces. Source: Anderl et al. (2012)

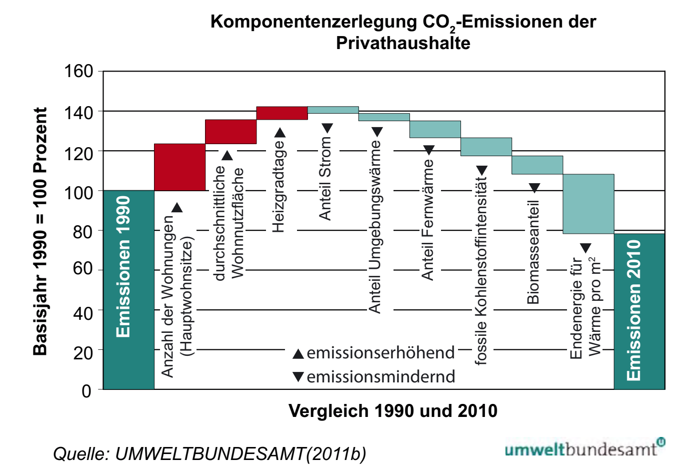


Abbildung 5.22 Komponentenzerlegung der Veränderung der THG-Emissionen der Privathaushalte für 1990–2010 in %. Quelle: Anderl et al. (2012)

Figure 5.22 Factors for the change of the CO_2-eq. emissions of private households from 1990 to 2010 in %. Source: Anderl et al. (2012)

Verhältnisses und der spezifisch größeren Wohnungsflächen. Vom Baualter hat die Periode 1961 bis 1980 die höchsten Emissionen, da hier die größte Bauaktivität nach dem Krieg stattgefunden hat. Die höchsten spezifischen und auch absoluten Emissionen haben jedoch Gebäude aus der Bauperiode von 1941 bis 1960, da nach dem 2. Weltkrieg die Priorität auf die möglichst billige Schaffung von möglichst viel Wohnraum gelegt wurde (Kletzan et al., 2006). Aus Abbildung 5.20 wird deutlich, dass der Hauptansatzpunkt für eine Reduktion der THG-Emissionen im Gebäudebereich in der hochwertigen thermischen Sanierung inklusive eines Energieträgerwechsels hin zu erneuerbaren Energie von Einfamilienhäusern, gefolgt von Mehrfamilienhäusern liegt, da diese die höchsten THG-Emissionen aufweisen. Neubauten werden durch die, im Folgenden beschriebenen, aktuellen Baugesetze und Förderbedingungen bereits in Richtung Energieeffizienz und in weiterer Folge zu „Nearly Zero Energy Buildings“ (Nahe Null-Energie Gebäude) errichtet.

In der Bundesländerinventur erfolgt die Regionalisierung der nationalen Emissionsdaten auf Ebene der Bundesländer. Diese wird jährlich durch das Umweltbundesamt in Kooperation mit den Ämtern der Landesregierungen durchgeführt (Anderl et al., 2011a; 2012a).

Die dabei angewandte Methodik orientiert sich an den Standardregeln der internationalen Emissionsberichterstattung, wie z. B. dem Kyoto-Protokoll. Die Bundesländer-Emissionsdaten werden jeweils konform zu den offiziellen Statistiken Österreichs erstellt (z. B. Bundesländer-Energiebilanz) und weisen somit eine hohe Vergleichbarkeit mit der nationalen Inventur auf.

Für den Bereich der Privathaushalte wurde vom Umweltbundesamt die in Abbildung 5.21 gezeigte Emissionsentwicklung ausgewiesen (Anderl et al., 2012).

Die unterschiedlichen Pro-Kopf-Emissionen spiegeln die verschiedenen Strukturen und deren Entwicklung in den einzelnen Bundesländern wider. In Bundesländern mit überwiegend urbanen Strukturen, wie z. B. in Wien, werden durch die kompakte Bauweise trotz eines relativ hohen Einsatzes fossiler Energieträger relativ niedrige Emissionen ausgewiesen.

In den Bundesländern mit vorwiegend ländlicher Struktur lagen die Emissionen 1990 höher, v. a. bedingt durch eine weniger kompakte Bauweise und höhere Nutzflächen pro Kopf. Deutliche Emissionsreduktionen konnten durch eine Steigerung der Gebäudequalität (z. B. in Vorarlberg, Kärnten und der Steiermark) sowie den vermehrten Einsatz erneuerbarer Energieträger (v. a. in Oberösterreich und der Steiermark) erreicht werden (Anderl et al., 2012).

Die wesentlichen Treiber für die insgesamt positive Entwicklung in den letzten beiden Jahrzehnten wurden vom Umweltbundesamt in einer so genannten Komponentenzerlegung ermittelt. Dabei werden die Emissionen im Ausgangs-

und Endjahr (z. B. 1990 und 2010) gegenübergestellt und die wesentlichen emissionserhöhenden und emissionssenkenden Faktoren analysiert. Für den Bereich „Privathaushalte" (Emissionen durch Raumwärme- und Warmwasseraufbereitung) ist dies in Abbildung 5.22 dargestellt (Anderl et al., 2012).

Wichtigster emissionserhöhender Faktor war der Anstieg der Hauptwohnsitze, gefolgt von dem Anstieg der durchschnittlichen Wohnfläche pro Kopf. Emissionssenkend war insbesondere der sinkende Endenergiebedarf pro Wohnfläche, verursacht durch strengere Standards im Neubau sowie die thermische Sanierung.

5.2.4 Minderung oder THG-Reduktion: Emissionsminderung durch Energieeffizienz und den Einsatz erneuerbarer Energieträger

Gesetzliche Rahmenbedingungen und Förderungen

Da der Baubereich gemäß Verfassung Länderangelegenheit ist, gibt es neun unterschiedliche Bauordnungen. Diese waren in der Vergangenheit nicht aufeinander abgestimmt. Mit Beginn des Jahres 2008 wurden jedoch in den meisten Bundesländern die Bauvorschriften in Richtung einer Harmonisierung der bautechnischen Vorschriften novelliert. Grundlage bilden die Arbeiten des Österreichischen Instituts für Bautechnik (OIB), einer Organisation der österreichischen Bundesländer. Das Konzept sieht vor, dass die vereinheitlichten bautechnischen Vorschriften in zwei Ebenen gegliedert sind:

- Die Rechtsvorschriften (Gesetze oder Verordnungen) enthalten nur zielorientierte (funktionale) Anforderungen, die längerfristig Gültigkeit haben und unabhängig von konkreten technischen oder planerischen Lösungen sind.
- Zur Umsetzung dieser gesetzlichen Anforderungen dienen konkrete technische Anforderungen (Leistungsanforderungen oder vorgeschriebene Ausführungen). Diese werden in den vom OIB im Auftrag der Bundesländer erarbeiteten und herausgegebenen Richtlinien festgelegt, auf die wiederum in den Rechtsvorschriften verwiesen wird (Mikulits, 2009). In der Literatur wird dies als „Performance based Approach" bezeichnet (IRCC, 1998).

Die OIB-Richtlinien sind weitestgehend mit den wesentlichen Anforderungen (ER – Essential Requirements) der Bauproduktenrichtlinie (EU-Richtlinie 89/106 EWG, 1989) kompatibel. Im Gegensatz dazu sind die, für die Nachhaltigkeitsbetrachtungen relevanten, funktionalen und technischen Qualitäten in Österreich noch nicht einheitlich festgelegt (Passer et al., 2009; Passer et al., 2010).

Planung und Ausführung der Bauwerke, unter Berücksichtigung der funktionalen und technischen Anforderungen der bautechnischen Bestimmungen, können mit Hilfe des Normenwerks, das mit den „Wesentlichen Anforderungen" der Bauproduktenrichtlinie bzw. in Zukunft mit den Basisanforderungen der Bauproduktenverordnung (BPV) kompatibel ist, durchgeführt werden (Mikulits, 2011; Maydl et al., 2010). Das bedeutet, brauchbare bzw. verwendbare Bauprodukte werden eingebaut, welche die Wechselwirkungen zwischen Bauprodukt, Baukonstruktion und Bauwerk berücksichtigen und die damit verbundenen spezifischen Anforderungen, ergänzt um beschreibende / definierende Leistungsanforderungen der BPV, erfüllen (Passer et al., 2009; Passer et al., 2010).

Im Anhang 1 sind die 2010 gültigen Gesetze und Verordnungen des Bundes und der österreichischen Bundesländer zur Implementierung der EU-Gebäuderichtlinie (EU-Richtlinie 2002/91/EU, 2002), des Energiebedarfs und der Emissionen aufgelistet. Im Folgenden wird die mit EPBD (Energy Performance of Buildings Directive) abgekürzte Richtlinie genauer dargestellt, da sie eine wichtige Grundlage für die Entwicklung der Baugesetze in Bezug auf Energieeffizienz und THG-Emissionseinsparung darstellt.

EU-Gebäuderichtlinie und österreichische Begleitgesetze

Die EPBD, stellt einen verbindlichen ganzheitlichen Ansatz für die gesamte energetische Bewertung von Gebäuden (Wohn- und Nichtwohngebäude) dar und fordert die Festlegung von nationalen Standards für den Neubau und für den Bestandsbereich ab einer Größe von 1 000 m². Ein weiterer wichtiger Punkt der Richtlinie beinhaltet die Einführung eines Energieausweises, welcher bei Neubau, Verkauf und Vermietung von Gebäuden bzw. Gebäudeteilen (Nutzungseinheiten) zu erstellen und vorzulegen ist. In öffentlichen Gebäuden müssen diese öffentlich sichtbar ausgehängt werden. Weiters sind regelmäßige Inspektionen von Heizkesseln mit einer Leistung > 20 kW und von Klimaanlagen mit einer Leistung > 12 kW vorgeschrieben. Die Auswertung der Umsetzung der Maßnahmen erfolgt durch die EU-Kommission.

Im Mai 2010 wurde eine Neufassung der Richtlinie seitens des Europäischen Parlaments und des Rates veröffentlicht (EU-Richtlinie 2010/31/EU, 2010). Als wesentliche Änderungen sind die verpflichtende Evaluation der Nutzung erneuerbarer Energieträger für alle Gebäude und die Vorgabe,

nach der alle neuen öffentlichen Gebäude ab 2018 sowie alle privaten Gebäude ab 2020 sogenannte „Nearly Zero Energy“ („Nahe Null-Energie“) Gebäude sein müssen, zu nennen. Der Energieausweis muss nun bei Bau, Verkauf oder Vermietung vorgelegt werden. Zudem muss „der Ausweis über die Gesamtenergieeffizienz Empfehlungen für die kostenoptimale oder kosteneffiziente Verbesserung der Gesamtenergieeffizienz des Gebäudes oder Gebäudeteils enthalten, es sei denn, es gibt kein vernünftiges Potenzial für derartige Verbesserungen gegenüber den geltenden Anforderungen an die Gesamtenergieeffizienz“ (EU- Richtlinie 2010/31/EU, 2010, S. 32, Punkt 2). Kostenoptimal bezieht sich hierbei auf die gesamte Lebensdauer des Gebäudes. Die nähere Definition des Begriffs „Nearly Zero Energy“ obliegt den Mitgliedsländern.

Eine Auswirkung der EPBD auf Österreich ist die Harmonisierung der Bauordnungen der Bundesländer durch das OIB. Richtlinie 6 der Harmonisierung beschäftigt sich mit der Umsetzung der EPBD in Österreich. Für die Berechnung steht ein vereinfachtes Tabellenkalkulationsprogramm zur Verfügung. Parallel dazu wurde ein vereinfachtes Verfahren für Bestandsgebäude (Altbauten) entwickelt. Außerdem wurden Grenzwerte für die Bauordnung, die Gestaltung des Energieausweises, die Bedingungen zur Zertifizierung von Ausstellern des Energieausweises und zur Inspektion von Heizkesseln und Klimaanlagen definiert. Auf Bundesebene ist die Umsetzung durch das Bundesgesetz über die Pflicht zur Vorlage eines Energieausweises beim Verkauf und bei der In-Bestand-Gabe von Gebäuden und Nutzungsobjekten durch das Energieausweis-Vorlage-Gesetz (EAVG 2012) geregelt. Nach diesem Gesetz müssen ab 1. Jänner 2008 die Energieausweise ausgestellt werden. Ausgenommen hiervon sind Gebäude, bei denen KäuferIn und VerkäuferIn übereinkommen, dass sie keinen Energieausweis benötigen. In diesem Fall wird eine dem Alter und der Art des Gebäudes entsprechende Gesamtenergieeffizienz als vereinbart angenommen.

Die OIB-Richtlinie ist in 8 von 9 Bundesländern in die Landesgesetze übernommen worden. Mit 2011 wurde die OIB-Richtlinie 6 einer Revision unterzogen, welche über Kennzahlen die Einbeziehung des Primärenergiebedarfs und der CO_2-Emissionen in den Energieausweis regelt.

Das EAVG wurde 2012 novelliert (EAVG 2012), den Erfordernissen der EU-Richtlinie angepasst und ist mit 1. Dezember 2012 in Kraft getreten.

Grenzwerte werden derzeit für den Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) (Tabelle A2-1, Anhang 2), den Heizwärmebedarf (HWB) (Nutzenenergie) in Abhängigkeit des Verhältnisses von Volumen zum Oberflächenverhältnis der Gebäude und des Kühlbedarf (Nutzenergie) sowie den Heizenergiebedarf (Endenergie) vorgeschrieben. Für den Kühlbedarf (Nutzenergie) muss für Wohn- und Nichtwohngebäude der sommerliche Überwärmeschutz nach ÖNORM B 8110 Teil 3 nachgewiesen werden. Dies gilt auch für die umfassende Sanierung von Wohngebäuden. Alternativ dazu kann in Nichtwohngebäuden ein spezifischer Kühlenergiebedarf von 1 kWh / m^3 / Jahr im Neubau und 2 kWh / m^3 / Jahr bei Renovierung nachgewiesen werden (OIB Richtlinie 6, 2011). De Facto müssen somit alle Gebäude in Österreich so gebaut werden, dass praktisch kein Kühlbedarf auftritt. Damit hat Österreich für den Kühlbedarf eine der strengsten Bestimmungen im EU-Raum.

Im Energieausweis selbst werden der Heizwärmebedarf, der Primärenergiebedarf, die CO_2-Emissionen und ein Gesamtenergie-Effizienzfaktor der Gebäudetechnik jeweils für das Standortklima angegeben und in den Bewertungsklassen von A++ bis G eingeordnet. Zudem werden auf einer zweiten Seite einige weitere energetische Kennzahlen aufgeführt. Für den Primärenergiefaktor kommen Umrechnungswerte nach Tabelle A2.2 zur Anwendung. Tabelle A2.3 zeigt die der Klasseneinteilung zugrundeliegenden Werte.

Die komplette Umsetzung der EPBD, mit der Vorlage des Energieausweises vor Errichtung des Gebäudes, wird zu einer genaueren Planung der Gebäude führen, da bereits viele technische Details der Haustechnik in der Planung festgelegt werden müssen und eine intensive Beschäftigung mit dem gesamten Gebäude stattfinden muss. Zudem sollen die Energieausweise in der österreichischen Grundstücksdatenbank hinterlegt werden, sodass man beim Kauf eines Gebäudes auf diese zurückgreifen kann. Damit soll die Bewertung des Gebäudes anhand des Energiebedarfs erleichtert werden.

Mietrechtsgesetz, Wohnungseigentumsgesetz und Wohnungsgemeinnützigkeitsgesetz

Wie in Abschnitt 5.2.1 gezeigt, liegt das größte Potenzial der Reduktion von THG-Emissionen im Gebäudebereich, konkret in der Sanierung von Gebäuden. Dabei spielen auch andere Gesetzesmaterien, wie z. B. das Mietrechtsgesetz, das Wohnungseigentumsgesetz und das Wohnungsgemeinnützigkeitsgesetz, eine wichtige Rolle. In diesen ist festgelegt, unter welchen Umständen (Anzahl der Beteiligten MieterInnen / EigentümerInnen, die einer Sanierung zustimmen müssen, Auflösung von bereits vorhandenen oder zukünftigen Rücklagen) eine thermische Sanierung von Wohngebäuden, die unter diese Gesetze fallen, stattfinden kann bzw. inwieweit z. B. eine Mieterhöhung aufgrund der thermischen Sanierung gerechtfertigt ist. Diese Gesetzesmaterien könnten sicherlich in Hinblick auf eine Erhöhung der hochwertigen Sanierungsrate überarbeitet

werden. Da diese Gesetze primär Mehrfamilienhäuser betreffen, wird die Auswirkung der Gesetzesänderung auf den Treibhauseffekt aber nicht allzu hoch sein (Köppl, 2001).

Möglichkeiten von Förderungen

Die Wohnbauförderung ist ein über die Bauordnung hinausgehendes Lenkungselement für energieeffizientes Bauen und die Nutzung erneuerbarer Energieträger. Seit 1988 haben die Bundesländer die Hoheit über die Gelder.

In den letzten Jahren wurde der Zielhorizont der Wohnbaufördersysteme schrittweise um die Themen Bauökologie, Barrierefreiheit und Sicherheit erweitert (Amann, 2004). Der Anteil der Mittel zur Wohnbausanierung stagniert in den letzten 10 Jahren bei etwa 25 %. Seit 2006 sind für die Wohnbauförderung einheitliche Mindest-Grenzwerte für den Heizwärmebedarf bei Neubau und Sanierung in den österreichischen Bundesländern mittels §15a „Vereinbarungen" festgelegt. 2012 wurden diese Grenzwerte neuerlich verschärft (BgBl, 2009: Art. 15a B-VG, siehe Anhang 2). Zudem wurden Grenzwerte für den Neubau und die Sanierung von öffentlichen Gebäuden festgelegt, sodass Neubauten praktisch im Passivhausstandard errichtet werden müssen. Darüber hinaus werden Mindest-U-Werte für Bauteile definiert (siehe Anhang 2). Es steht den Bundesländern jedoch frei, über die Mindestwerte hinaus Anforderungen festzulegen.

Die folgend angeführte Reduktion des HWB und der CO_2-Emissionen können dem Instrument der Wohnbauförderung zugerechnet werden. Der HWB im Wohnungsneubau betrug im Durchschnitt 28,8 kWh / m² / Jahr im Jahr 2011. Für das Jahr 2006 betrug der Wert noch 42 kWh / m² / Jahr. Der HWB nach gesamthafter thermisch-energetischer Sanierung von Wohnbauten erreichte 2011 einen durchschnittlichen Wert von 48,8 kWh / m² / Jahr. 2006 lag HWB nach Sanierung noch bei rund 67 kWh / m² / Jahr.

Durch Wohnbauförderungsmaßnahmen der Länder konnten im Jahr 2011 Emissionseinsparungen im Ausmaß von rund 313 000 t CO_2 angestoßen werden. Die Einsparung ist damit um 29 % niedriger als die für 2010 ermittelte (rund 441 000 t CO_2). Von den 2011 ausgelösten CO_2-Emissionsreduktionen entfielen 89 % (280 000 t) auf geförderte Maßnahmen im Bereich thermisch-energetischer Sanierungen (Gebäudehüllensanierungen und Heizungserneuerung bzw. Heizungstausch). Die über die Wohnbauförderung abgewickelte Sanierungsrate beträgt im Mittel von 2006 bis 2011 etwa 1 % / Jahr (tatsächlich sanierte Bruttogeschoßfläche (BGF) / Einwohner versus verfügbare BGF / Einwohner) (Lebensministerium, 2013).

„Neben den sozialen Aufgaben der Wohnbauförderung ist die Umsetzung von Umweltmaßnahmen, insbesondere die Fokussierung auf Klimaschutz im Neubau und der Sanierung, eine wesentliche Aufgabe. Um dieser Aufgabe künftig in verstärktem Ausmaß im Sinne dieser Vereinbarung gerecht werden zu können, ist es von wesentlicher Bedeutung, dass die Vertragsparteien adäquate Mittel für Zwecke der Wohnbauförderung sicherstellen, wobei der Sanierung eine besondere Bedeutung zukommt. Im Rahmen dieser Vereinbarung wird auch Rücksicht auf die Bereiche der Luftreinhaltung genommen, die von Maßnahmen zur Reduktion des Ausstoßes von Treibhausgasen beeinflusst werden" (BgBl, 2009: Art. 15a B-VG).

Technische Entwicklungen der Gebäudeenergieeffizienz

Für die folgenden Ausführungen wurden mehrere österreichische Studien der letzten 5 Jahre ausgewertet (Schriefl, 2007; Bliem et al, 2011; Müller et al., 2010; Christian, 2011; Streicher et al., 2010; Anderl et al., 2011; Köppl et al., 2011).

Neubau

Die technische Entwicklung von Baustoffen und Bauteilen in Bezug auf Energieeffizienz erfährt seit der Energiekrise von 1980 einen enormen Aufschwung. Waren etwa 1980 noch 2-Scheiben-Verglasungen mit Luftfüllung und einem U-Wert von 2,5 W / m² / K Standard, so sind es heute 2-Scheiben-Verglasungen mit einem U-Wert von 1,1 W / m² / K. Selbst 3-Scheiben-Verglasungen mit einem U-Wert unter 0,6 W / m² / K sind nicht mehr wesentlich teurer. Ähnlich entwickelten sich die Wärmedämmsysteme. So sind heute einlagige Dämmstärken von 20–30 cm kostengünstig erhältlich und der Mehrpreis gegenüber Dämmstärken nach Bauordnung gering (U-Wert 0,35 W / m² / K entspricht z. B. einer reinen Wärmedämmstärke von 10 cm). Im Neubau können heute U-Werte der Außenwände von 0,15–0,1 W / m² / K problemlos erreicht werden. Tabelle 5.4 zeigt den zeitlichen Verlauf der U-Werte von Außenbauteilen von 1919 bis 1991. Ähnliche Werte findet man im OIB-Leitfaden, 2007.

Zudem wurden viele Baudetails zur Vermeidung von Wärmebrücken und zur Erhaltung der Luftdichtheit von Gebäuden entwickelt. Durch die Luftdichtheit werden zusätzliche Wärmeverluste durch Infiltration von Außenluft vermieden. Die Lüftung in den Gebäuden muss nun aber kontrolliert – entweder über Fensterlüftung oder besser über eine mechanische Lüftungsanlage – erreicht werden.

Die Bauordnungen und Wohnbauförderungen passen sich mit einem gewissen Zeitverzug an diese Technologieentwick-

Tabelle 5.4 Entwicklung der Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte in W / m² / K) verschiedener Bauteile nach Bauperioden, Wohngebäude in Österreich. Quellen: Schriefl (2007), Werte für 2007 aus: OIB Richtlinie 6, 2007 und 2011

Table 5.4 Development of the heat transfer coefficients (U-values in W / m² / K) for various building components for different periods of time in Austria. Source: Schriefl, 2007, values of 2007 from: OIB guideline 6, 2007 und 2011

	U-Werte in W / m² K				
Bauperiode	Oberste Geschoßdecke	Außenwand	Fenster	Türen	Kellerdecke / Fußboden
vor 1919	1,1	1	3,1	2,5	1,5
1919–1944	1,2	1,2	3,2	2,2	1,4
1945–1960	1,2	1,35	3,3	2	1,1
1961–1970	1,2	1,25	3	1,8	1,1
1971–1980	0,3	0,7	2,2	1,7	0,9
1981–1990	0,3	0,6	1,9	1,6	0,63
1991–2007	0,25	0,45	1,7	1,6	0,6
2007–	0,2	0,35	1,7	1,7	0,4

Tabelle 5.5 Heutige und Annahmen über zukünftige Neubauraten sowie Heizwärme- und Kühlenergiebedarf in verschiedenen Studien. Eigene Zusammenstellung

Table 5.5 Todays and predicted rate of new buildings per year as well as space heating and cooling energy demand of various studies. Compiled by the author

	bis 2010	2010–2030		2030–2050	
Studie	Rate (% / a)	Rate (% / a)	Spezifischer Energiebedarf (kWh / m² a)	Rate (%/a)	Spezifischer Energiebedarf (kWh / m² a)
Bliem et al., 2011					
Wohngebäude		0,5		0,5	
Dienstleistung		1,7		1,7	
Müller et al., 2010					
Wohn- und Nichtwohnge-	1	0,2–1		0,1	
bäude			30		10
HWB					
Christian, 2011[1]					
Pragmatisch					
HWB: EFH+MFH		0,86	40	0,74	25
WWB: EFH+MFH				0	
HWB: Dienstleistung		0,67	70	0,67	40
Forciert HWB: Dienstleistung		0,33	30	0,33	10
Streicher et al., 2010					
Wachstum		0,8		0,8	
Konstant		0,0		0,0	
HWB: EFH			20		20
HWB: MFH klein			15		15
HWB: MFH groß			10		10
KB: EFH			1		1
KB: Dienstleistung			40 / 30		40 / 30
WWWB: Wohngebäude			17 / 13		17 / 13
WWWB: Dienstleistung			6 / 4		6 / 4
Strombedarf ohne Haustechnik					
Wachstum		0,0		0,0	
Konstant		0,26		0,26	
Anderl et al., 2011			−5 bis −10	-	-

[1] Bei Christian (2011) von 2010–2020 und von 2020–2050

HWB: Heizwärmebedarf , KB: Kühlbedarf, WWWB: Warmwasserwärmebedarf, EFH: Einfamilienhaus, MFH: Mehrfamilienhaus , klein: <= 10 Wohneinheiten

Tabelle 5.6 Heutige und Annahmen über zukünftige Sanierungsraten und Sanierungsgüte in verschiedenen Studien. Eigene Zusammenstellung

Table 5.6 Todays and predicted rate renovation per year and quality of renovation of various studies. Compiled by the author

	Bis 2010		2010–2030		2030–2050	
Studie	Rate (%/a)	HWB Güte (kWh/m² a)	Rate (%/a)	HWB Güte (kWh/m² a)	Rate (%/a)	HWB Güte (kWh/m² a)
Schriefl 2007	Ca. 1	k.A.	1–7[1]		1–7[1]	
Müller et al., 2010						
Wohn- und Nichtwohngebäude[2]	1,5		1–4	20–30	1–4	10–15
Bliem et al. 2011						
Christian, 2011						
Pragmatisch			1,0–1,5	40–70	1,5	40
Forciert			1,33–3	40	2–3	15
Streicher et al., 2010	Ca.1	k.A.				
Szenario konstant			3	70	1	40
Szenario Wachstum			3	70	1	40
Anderl et al., 2011	0,7		1,6–1,8			

[1] Je nach Szenario und ausgetauschtem Teil
[2] Gegliedert nach Altersklassen mit einem Kohortenmodell

Tabelle 5.7 Annahmen über aktuelle und zukünftige Jahresnutzungsgrade verschiedener Wärmeerzeuger mit Warmwasserbereitung. Eigene Zusammenstellung

Table 5.7 Estimated todays and predicted seasonal efficiencies of various heat producers for domestic hot water and space heating. Compiled by the author

	Jahresnutzungsgradentwicklung von 2000/2050		
	Streicher et al. 2010	Schriefl 2007	Müller et al. 2010
Elektro Direktheizung	1,0/1,0	0,95/0,96	
Ölheizung (Brennwert)	0,80/0,95	0,89/0,92	0,89/0,90
Gas-Etagenheizung		0,92/0,94	
Gas Zentralheizung	0,85/0,95[1]	0,94/0,95	0,80/0,82
Gas Brennwertkessel		1,04/1,05	0,92/0,93
Scheitholzkessel		0,85/0,87	
Hackschnitzelkessel	0,68/0,81[2]	0,87/0,89	
Pelletskessel		0,88/0,90	
Kohleheizung			0,7/0,72
Wärmepumpe Heizen (COP)	3,14/4,0[3]		
Luft/Luft			
Luft/Wasser		3,0/3,6	3,0/4,0–4,4[4]
Wasser/Wasser		4,3/4,9	4,0/5,2–5,5
Erdreich/Wasser		3,9/4,7	4,2/5,0[4]
Wärmepumpe Kühlen	2,14/3,0		

[1] Als Mittelwert über alle Gaskessel
[2] Als Mittelwert über alle Biomassekessel
[3] Als Mittelwert über alle Wärmepumpen
[4] Für Luft Wasser Wärmepumpen bei L2W35 und für Erdreich Wasser Wärmepumpen bei S0W35

lung an. So ist gewährleistet, dass die geforderten Produkte auch ausreichend am Markt verfügbar sind und es ist mit einer weiteren Herabsetzung der U-Werte für Neubauten und Sanierung zu rechnen (sehr wahrscheinlich).

Tabelle 5.5 zeigt die Annahmen verschiedener österreichischer Studien für die zukünftigen Neubauraten und den spezifischen Nutzenergiebedarf für Heizen (HWB) und Kühlen (KB) sowie den Energiebedarf für die Warmwasserbereitung (WWWB). Die angenommenen Neubauraten schwanken zwischen 0 und 1,7 %/Jahr. Der HWB für neue Gebäude wird teils wenig ambitioniert mit 40–70 kWh/m²/Jahr angegeben, was bereits der heutigen Bauordnung entspricht, und teils mit Werten nahe den Passivhausvorgaben mit 15 kWh/m²/Jahr angenommen.

Tabelle 5.8 Verschiedene Szenarien des Gesamtenergiebedarfs im Gebäudebereich bis 2050. Eigene Zusammenstellung
Table 5.8 Various scenarios of the end-use energy demand of the building sector until 2050. Compiled by the author

Studie	Private Haushalte	Dienstleistungen	Summe	Reduktion Summe
	PJ/a	PJ/a	PJ/a	%
Startwert 2010	287	122	409	
Schriefl 2007[1]	250		140–240	4–44
Müller et al., 2010[2]	120	64	178	50
Bliem et al. 2011	105	78	183	55
Christian, 2011				
Pragmatisch	147	101	248	38
Forciert	62	47	109	73
Streicher et al. 2010				
Szenario konstant			211	52
Szenario Wachstum			240	41
Köppl et al. 2011[3]			167	59

[1] Bis 2020, nur Raumheizung und Warmwasserbereitung bei Privaten Haushalten
[2] Bis 2050, nur Raumheizung und Warmwasserbereitung, Startwert 2010 360 PJ
[3] Bis 2020, nur Raumheizung und Warmwasserbereitung bei Private und Öffentliche Dienstleistungen, je nach Szenario, Summe aller Wedges

Gebäudesanierung

Die Gebäudesanierung kann über mehrere Mechanismen erfolgen:

- Sanierung unter Beibehaltung der Gebäudesubstanz
- Sanierung unter Veränderung der Gebäudesubstanz
- Abriss und Neubau

Während in den betrachteten Studien zwischen den ersten beiden Punkten nicht unterschieden wird, wird die Abrissrate zwischen 0,20–0,33 %/Jahr (Christian, 2011), 0,4 %/Jahr pauschal (Streicher et al., 2010) sowie 0,87 %/Jahr für Gebäude welche vor 1919 errichtet wurden und 0,12 %/Jahr für Gebäude mit einem Baujahr nach 1971 (Schriefl, 2007) angenommen (Tabelle 5.6).

Technologisch gilt für die Gebäudesanierung ähnliches wie für den Neubau. Es existiert eine Vielzahl von technischen Möglichkeiten, die laufend weiter ausgebaut werden. Allerdings mangelt es an günstigen Sanierungslösungen, bei denen die BewohnerInnen während der Sanierung in den Gebäuden verbleiben können, und oftmals an Anbietern von Sanierungs-Gesamtlösungen inklusive Förderungsabwicklung. Einige Demonstrationsprojekte zeigen jedoch erfolgversprechende Ansätze, sodass in Zukunft mit einer verstärkten Industrialisierung in diesem Bereich zu rechnen ist (wahrscheinlich).

Effizienz der Gebäudetechnik

Auch bei der Gebäudetechnik ist aufgrund der technischen Möglichkeiten eine gewisse Effizienzsteigerung der Einzelkomponenten zu erwarten und in Bezug auf das Gesamtsystem machbar (Tabelle 5.7). In der Realität werden allerdings oft immer komplexere Systeme eingesetzt, die aufgrund der vielen Freiheitsgrade selten optimal eingestellt und nicht gewartet werden. Damit steigt die Effizienz der Gebäudetechnik derzeit eher nicht. In Zukunft ist vor allem im Bereich der Wärmepumpen mit einer Erhöhung der Effizienz zu rechnen. Die anderen Wärmeerzeuger haben bereits einen Wirkungsgrad nahe 100 %. Allerdings zwingen die in der OIB Richtlinie 6 (2011) vorgegebenen Grenzwerte und die Prüfung, ob erneuerbare Energieträger einsetzbar sind, die PlanerInnen zum Überdenken der Gebäudetechnikkonzepte. Bei der Beleuchtung ist davon auszugehen, dass sich die LED-Technologie verstärkt durchsetzen wird, was zu einer weiteren Reduktion des Energiebedarfs für Beleuchtung führen wird (sehr wahrscheinlich).

Gesamtenergiebedarf im Gebäudebereich

Der Gesamtenergiebedarf für den Gebäudebereich bis 2050 wird von verschiedenen Studien folgendermaßen prognostiziert (Tabelle 5.8):

Übereinstimmend wird in allen Studien eine starke Reduktion des Energiebedarfs im Gebäudebereich unterstellt.

Einsatz erneuerbarer Energieträger im Gebäudebereich

Erneuerbare Energieträger können im Gebäudebereich vielfältig – etwa zum Heizen und zur Stromerzeugung – eingesetzt

Tabelle 5.9 Szenario-Ergebnisse zur Nutzung erneuerbarer Energieträger des Gebäudebereichs 2050. Eigene Zusammenstellung
Table 5.9 Results of renewable energy scenarios for the building sector for 2050. Compiled by the author

Studie	Biomasse / Biogas / Fernwärme	Solarthermie	Wärmepumpe	Strom erneuerbar	Summe
	Angaben in % des Endenergiebedarfs				
Startwert 2010	23,8	1,5	1,6		26,9
Müller et al., 2010 (Basisszenario)[4]	41	13	13	nn	67
Bliem et al. 2011	26,2	0?	25,4	42,3	93,9
Christian, 2011[3]					
Pragmatisch	44,9	7,5	6,6	30,6	89,5
Forciert	45,5	6,3	5,6	34	91,4
Streicher et al. 2010					
Szenario konstant	18,5	23,2	23,2	35,0	100
Szenario Wachstum	5,4	28,9	28,4	39,2	100
Energiestrategie Österreich 2010[1]					32
Köppl et al. 2011[2]					ca. 25

[1] Bis 2020
[2] Bis 2020, nur Raumheizung und Warmwasserbereitung bei Private und Öffentliche Dienstleistungen, je nach Szenario, Summe aller Wedges
[3] Eigene Berechnungen aus Christian 2011
[4] Bis 2050, nur Raumheizung und Warmwasserbereitung

werden. Bei der Analyse der zur Verfügung stehenden Potenziale muss jedoch das gesamte Energiesystem mit Mobilität, Gewerbe und Industrie sowie Gebäuden betrachtet werden. Eine isolierte Betrachtung des Gebäudesektors, ohne Analyse der Wechselwirkungen, könnte zu hohe Potenziale erneuerbarer Energieträger für den Gebäudebereich ergeben.

Für die Abschätzung der Nutzung erneuerbarer Energieträger für Österreich im Jahr 2050 sind verschiedene Studien vorhanden. Einige davon (Bliem et al., 2011; Christian, 2011; Streicher et al., 2010) betrachten das gesamte Energiesystem und gehen von der Prämisse einer möglichst vollständigen Energieversorgung Österreichs durch erneuerbare Energieträger aus. Müller et al. (2010) beschränken sich auf den Heizwärmebedarf von Gebäuden zur Raumheizung und Warmwasserbereitung, Köppl et al. (2011) beschreiben mögliche oder voraussichtliche Entwicklungen bis 2020. Ergebnisse des Anteils von erneuerbaren Energieträgern an der Deckung des Energiebedarfs sind in Tabelle 5.9 angeführt.

Bei den Studien, die bis zur Mitte des Jahrhunderts eine weitgehende Decarbonisierung des Sektors unterstellen, sind die Ergebnisse für den Gebäudebereich zum Teil ähnlich:

- Biomasse behält in den Studien von Bliem et al. (2011) und Streicher et al. (2010) in etwa ihren momentanen Stellenwert bzw. wird bei wachsendem Bedarf verstärkt für andere Sektoren genutzt und verliert daher im Gebäudebereich an Gewicht. Christian (2011) stellt hier eine Ausnahme dar, da in dieser Studie um 100 PJ mehr Biomassepotenzial konstatiert wird.
- Da Müller et al. (2010) nur den Wärmebedarf im Gebäudebereich betrachten, hat die Biomasse ebenfalls eine übermäßig große Rolle, da die anderen Sektoren nicht berücksichtigt werden.
- Die Nutzung von Solarthermie und Wärmepumpen nimmt bei Bliem et al. (2011) und Streicher et al. (2010) stark zu. Bei Christian (2011) fällt dieser Anstieg wiederum wesentlich geringer aus, da seinen Berechnungen zu Folge mehr Biomasse zur Verfügung steht.
- Strom aus erneuerbaren Energieträgern spielt als Antrieb für Wärmepumpen und für den Haushaltsstrombedarf die größte Rolle.

Bei den CO_2-Emissionen im Gebäudebereich gibt es zwei Studien (Energiestrategie Österreich: BMFLUW und BMWFJ, 2010; Köppl et al., 2011) mit Szenarien nur bis zum Jahr 2020. Die Emissionsreduktion wird mit 34 (Energiestrategie Österreich) bzw. 64 % (Köppl et al., 2011) gegenüber dem Startwert von 2009 angegeben. Die Studien mit einer Annahme einer möglichst hohen Deckung des Energiebedarfs mit erneuerbaren Energieträgern bis 2050 weisen naturgemäß keine THG-Emissionen aus, da nur erneuerbare Energieträger, auch für die Erzeugung der Rohstoffe und für den Energietransport, eingesetzt werden. Tabelle 5.10 fasst die Ergebnisse der betrachteten Studien zusammen. Alle Studien zeigen eine

Tabelle 5.10 Szenario-Ergebnisse zu den THG-Emissionen des Gebäudebereichs bis 2050 in Mt CO_2-Äq. Eigene Zusammenstellung

Table 5.10 Results of greenhouse gas emissions of renewable energy scenarios for the building sector for 2050 in Mt CO_2-eq. Compiled by the author

Studie	2005	2009	2020	2050
Startwert 2010	12	11,3		
Müller et al., 2010		19[2]	9,4	4,3
Bliem et al. 2011				
Christian, 2011 Pragmatisch Forciert			Keine Angaben, CO_2 nicht behandelt	
Streicher et al. 2010 Szenario konstant Szenario Wachstum				Keine Emissionen, da 100 % Erneuerbar
Energiestrategie Österreich[1] (BMWFLU und BMWFJ, 2010)			7,5	
Köppl et al. 2011[1]		9	4,0	

[1] Bis 2020, nur Raumheizung und Warmwasserbereitung bei „Private und Öffentliche Dienstleistungen", je nach Szenario, Summe aller Wedges

[2] Der Wert von 19 Mio t CO_2-äquivalent Emissionen erscheint unrealistisch hoch und wird in Müller et al. 2010 auch nicht weiter ausgeführt.

starke Reduktion der CO_2-Emissionen des Gebäudebereichs für 2050 (sehr wahrscheinlich).

Als Portfolio zur Erreichung der Reduktion der CO_2-Äq.-Emissionen im Gebäudebereich werden in der Literatur und in den meisten Förderregimen des Bundes (Sanierungsscheck, Karner und Schleicher, 2010) bzw. der Länder (Wohnbauförderung, Art. 15a B-VG, BGBl, 2009) verschiedene Maßnahmen vorgeschlagen bzw. gefördert:

- Thermische Gebäudesanierung von bestehenden Gebäuden: der Anteil an der THG-Emissionen-Einsparung am gesamten Portfolio beträgt zwischen 37 % bis 2020 (Köppl et al, 2011) und 58 % bis 2050 (Streicher et al., 2010).
- Austausch der Heizungsanlage und Wechsel auf erneuerbare Energieträger und fallweise Gas-Brennwert-Geräte: der Anteil an der THG-Emissionen-Einsparung am gesamten Portfolio beträgt zwischen 19 % bis 2050 (Streicher et al., 2010) und 46 % bis 2020 (Köppl et al., 2011). Bei der Betrachtung bis 2050 wurden bereits wesentlich mehr Gebäude thermisch saniert, was den Energiebedarf generell stark senkt und somit die Art und Güte der Wärmeerzeugung geringeren Einfluss hat.
- Einsatz von Solarthermie zur Wärmeversorgung: der Anteil an der THG-Emissionen-Einsparung am gesamten Portfolio beträgt zwischen 8 % bis 2020 (Köppl et al., 2011) und 14 % bis 2050 (Streicher et al., 2010).
- Neubau der Gebäude als Niedrigstenergie- oder Passivhausstandard: der Anteil an der THG-Emissionen-Einsparung am gesamten Portfolio beträgt zwischen 8 % bis 2050 (Streicher et al., 2010) und 9 % bis 2020 (Köppl et al., 2011). Durch die bereits recht strengen Baugesetze und der geringen Neubaurate ist dieser Anteil eher gering.
- Energieeffiziente Haushaltsgeräte: hier findet sich eine große Bandbreite der Aussagen in den Studien. Schlussendlich muss die Frage geklärt werden, ob die derzeitige Zunahme des Strombedarfs (siehe Abbildung 5.15) durch effiziente Geräte in eine Abnahme des Strombedarfs umgekehrt werden kann. Köppl et al., (2011) nehmen an, dass sich Effizienzerhöhung und Steigerung des Bedarfs die Waage halten werden, in Streicher et al. (2010) wird eine starke Abnahme des Strombedarfs angenommen.

Studien mit reinem Gebäudebezug

Die meisten Studien mit reinem Gebäudebezug kommen zu ähnlichen Energiebedarfs und CO_2-Emissionsszenarien im Gebäudebereich wie die Studien betreffend das Gesamte Energiesystem (z. B. Gobiet et al., 2009). Allerdings wird, ähnlich wie bei Müller et al. (2010), auch hier der Anteil der Biomasse an der Wärmeerzeugung höher geschätzt, als in den Studien, die das gesamte Energiesystem betrachten.

In wenigen Studien wird die graue Energie von Gebäuden sowie die damit verbundenen THG-Emissionen mit dem Energiebedarf bzw. den THG-Emissionen verglichen. Holzer und Hofstätter (2011) kommen für Niedrigenergie- und Passivhaus-Einfamilienhäuser, betrieben mit Pelletsheizung oder Wärmepumpe, auf etwa 20 Jahre Betriebszeit, bis die Betrieb-

semissionen die Emissionen beim Bau des Hauses überschreiten (abhängig von den verwendeten Baustoffen).

Graubner und Knauff (2008) kommen zum Schluss, dass das Treibhauspotenzial von Errichtung und Erneuerung von Einfamilienhaus-Energiesparhäusern über 80 Jahre Lebensdauer sogar höher sind, als die Betriebsemissionen. Als Wärmeerzeuger wurde hier ein Gas-Brennwertkessel und solare Warmwasserbereitung angenommen.

Um diese Unsicherheiten in Zukunft zu reduzieren, wird in Österreich derzeit an der Umsetzung der EU-Bauproduktenrichtlinie (89/106/EWG: EWG, 1989) gearbeitet, um die Baustoffe auch hinsichtlich des Treibhauspotenzials bewerten zu können (z.B. OIB, 2013). Hierbei wird der Energieverbrauch und die Emissionen (Treibhausgase, Versauerungspotenzial) von der Erzeugung bis zur Entsorgung, also über den gesamten Lebensweg der Baustoffe, betrachtet. Im englischen Sprachgebrauch spricht man hierbei von einer „Life Cycle Analysis".

Kosten und Nutzen für die THG-Reduktion im Gebäudebereich

Über die Kosten und sonstigen ökonomischen Auswirkungen, die im Gebäudebereich bei einer Reduktion der THG-Emissionen entstehen, gibt es einige Abschätzungen. Die Energiestrategie Österreich (BMFLUW und BMWFJ, 2010) geht von einem Investitionseinsatz von 2,6 Mrd. € / Jahr zur Erreichung einer 3 %-igen Sanierungsrate für Wohngebäude bis 2020 aus. Der damit ausgelöste Bruttoproduktionswert beträgt rund 4 Mrd. € / Jahr. Der Fördermitteleinsatz zur Erreichung dieser Investition wird mit ca. 1 Mrd. € / Jahr angegeben. Für Nichtwohngebäude, würden bei einer Sanierungsrate von 3 % noch einmal circa 400 Mio. € / Jahr dazukommen. Mit diesem Aufwand könnten bis 2020 ca. 4,1 Mt / Jahr THG-Emissionen und ca. 1,33 Mrd. € / Jahr an Energiekosten eingespart werden. Darüber hinaus könnten somit etwa 37 000 neue Arbeitsplätze geschaffen werden. Damit ergeben sich bei einer Laufzeit über 10 Jahre ca. 14 Mrd. € an Fördermitteleinsatz und ca. 3 400 € / t / Jahr dauerhafte Emissionseinsparung.

Köppl et al. (2011) gehen bei einem mittleren Investitionseinsatz von 4,7 Mrd. € / Jahr von 2009 bis 2020 von einer Reduktion von 3,2 Mt / Jahr CO_2 für das Jahr 2020 gegenüber einem Referenzszenario an. Hierbei wird von einer Steigerung der Sanierungsrate bis 5 % / Jahr bis 2020 und einer Sanierung auf 50 kWh / m² / Jahr Heizwärmebedarf, dem Neubau aller Gebäude im Passivhausstandard (15 kWh / m² / Jahr), dem Ersatz von alten Heizungssystemen durch effiziente Heizungssysteme mit erneuerbaren Energieträgern und dem Einsatz von Sonnenenergie für Raumheizung und Warmwasser ausgegangen.

In Karner und Schleicher (2010) wurden die Erfahrungen der mit 61 Mio. € dotierten österreichweiten Aktion „Sanierungscheck" dargestellt. In dieser Aktion wurden, zusätzlich zu den Förderungen der Bundesländer aus der Wohnbauförderung, umfassende Sanierungs- und Einzelmaßnahmen mit hohem energetischem Niveau und der Wechsel auf erneuerbare Energieträger oder Erdgas-Brennwertkessel gefördert. Die Förderung war innerhalb von 10 Wochen ausgeschöpft. Es wurden Maßnahmen in 14 000 Gebäuden (0,5 % der Nutzfläche des gesamten österreichischen Wohnungsbestands) unterstützt und das ausgelöste gesamte Investitionsvolumen betrug 485 Mio. €. Das Verhältnis von Förderung zu Investitionsvolumen betrug 1:8. Die Energieeinsparung wurde aufgrund der durchgeführten Maßnahmen mit rund 1,2 PJ / Jahr errechnet, was etwa 0,7 % (von 182 PJ) des Wärmebedarfs von Wohngebäuden entspricht. Der daraus errechnete CO_2-Effekt liegt bei rund 34 000 t / Jahr Einsparung, hochgerechnet auf 30 Jahre sind das rund 1,0 Mt. In der Studie wird angegeben, dass durch ein Investitionsvolumen von 100 Mio. € in die Gebäudesanierung 941 neue Beschäftigungsverhältnisse, vorwiegend im Inland, entstehen. In Summe werden durch die Gebäudesanierung aufgrund der gegenüber der Förderung höheren Einnahmen durch Steuerquoten positive Nettoeffekte beim Bundesbudget erwartet. Eine nähere Beschreibung der Studien Köppl et al. (2011) und Karner und Schleicher (2010) findet sich in Band 3, Kapitel 1.

Müller et al. (2010) weisen im Szenario „Business as Usual" jährliche Investitionskosten von 1,2 Mrd. € / Jahr für den Wechsel der Heizungssysteme in Richtung erneuerbare Energie aus. In diesem Szenario wird im Gebäudebereich eine CO_2-Einsparung von 67 % erreicht.

Nicht beachtet wurden in den Studien sekundäre Effekte auf die Wirtschaft, die sich z.B. aufgrund des Bedarfs an Wärmeerzeugern kleinster Leistung (z.B. für Passivhaus-Einfamilienhäuser 0,5–1,5 kW) oder der verminderten Wirtschaftlichkeit von Fernwärmenetzen bei der thermischen Sanierung von Gebäuden im Netzgebiet, bedingt durch den verringerten Wärmeverkauf bei annähernd gleichbleibenden Netzkosten, ergeben.

5.2.5 Adaptation, Anpassungsstrategien

Bedingt durch den mit dem Klimawandel verbundenen Anstieg der Außentemperatur wird sich der Heizenergiebedarf von Gebäuden verringern. Allerdings erhöht sich bei steigender Außentemperatur der Kühlbedarf (vergleiche auch Band 2,

Kapitel 6). Die Anpassungsstrategien an den Klimawandel im Gebäudebereich lassen sich auf vier relevante Themengebiete zusammenfassen:

- Auswirkungen des erwarteten Klimawandels auf den Heiz- und Kühlbedarf von Gebäuden.
- Legistische und förderungstechnische Maßnahmen zur Reduktion des Kühlbedarfs von Gebäuden (Abschnitt 5.2.4).
- Technische Maßnahmen zur Reduktion des Kühlbedarfs von Gebäuden (Gebäudeausrichtung, Fensterflächen, Speichermassen, Nachtlüftung etc., siehe z. B. Fink et al, 2002; Reim, 2006).
- Anpassung der technischen Normen in Bezug auf Naturkatastrophen und Klimawandel.

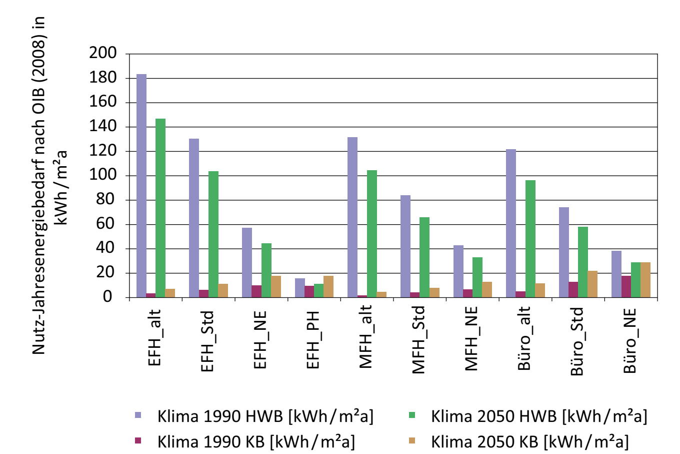


Abbildung 5.23 Spezifischer Heizwärmebedarf (HWB) und Kühlbedarf (KB) für Referenzgebäude am Beispiel des Klimas Graz in kWh / m² / Jahr; EFH: Einfamilienhaus, MFH: Mehrfamilienhaus, PH: Passivhaus, Büro: Bürogebäude. Quelle: Gobiet et al. (2009)

Figure 5.23 Specific space heating energy demand (HWB) and cooling demand (KB) for reference buildings in Graz climate in kWh / m² / year; EFH: single family house, MFH: multifamily house, PH passive house, Büro: office building. Source: Gobiet et al. (2009)

Bezüglich der Auswirkungen des Klimawandels auf den Heiz- und Kühlenergiebedarf von Gebäuden stehen zwei Studien zur Verfügung.

In Gobiet et al (2009) werden mit Hilfe der regionalisierten IPCC-Prognosen, basierend auf dem IPCC-Szenario IS92a (Legett et al., 1992; IPCC, 2000), und der Berechnungsalgorithmen nach der österreichischen normativen Umsetzung der EPBD die Auswirkungen des Klimawandels auf den zum Heizen und Kühlen notwendigen Energieverbrauch, jeweils für Referenz-, Ein- und Mehrfamilienhäuser sowie Bürogebäude, mit unterschiedlichen Energiekennzahlen für die Jahre 1990 und 2050 untersucht. Ebenso wird der Energiebedarf für ganz Österreich mit flächendeckenden Klimadaten analysiert.

Berger (2012) untersucht die Auswirkungen des Klimawandels ebenfalls mit einem regionalisierten Klimamodell, welches auf dem IPCC-Szenario A1B für den Standort Wien basiert. Dabei werden sieben reale Bürogebäude mit Hilfe einer dynamischen Gebäudesimulation analysiert. Beide Studien kommen zu sehr ähnlichen Ergebnissen. Abbildung 5.23 zeigt einen Anstieg des Kühlbedarfs zwischen 20 und 70 %. Die große Bandbreite ergibt sich aus dem sehr geringen Kühlenergiebedarf heute, bei dem auch nur kleine absolute Erhöhungen zu großen relativen Änderungen führen. Der Heizwärmebedarf wird um etwa 20 % für die verschiedenen Gebäude sinken und dominiert in den älteren Gebäuden. In Passivhäusern (PH und SOL4) ist bereits bei heutigem Klima der Kühlbedarf ähnlich dem sehr niedrigen Heizwärmebedarf. Für diese Gebäude ist der Kühlbedarf 2050 jedenfalls höher als der Heizwärmebedarf. Im extrem heißen Sommer im Jahr 2003 wurde in etwa das mittlere Klima 2050 nach dem in Berger (2012) verwendeten IPCC-Szenario erreicht.

Bereits heute ist der Kühlbedarf für neue Gebäude und Gebäude nach umfassender Sanierung durch den in der OIB-Richtlinie 6 (2011) vorgegebenen Nachweis des sommerlichen Überwärmeschutzes bzw. der Limitierung auf einen Kühlbedarf von unter 1 kWh / m³ / Jahr auf praktisch null bezogen auf das Klima 1990 limitiert. Damit werden diese Gebäude auch 2050 nur einen geringen Kühlbedarf aufweisen (sehr wahrscheinlich).

An technischen Maßnahmen zur Reduktion des Energiebedarfs, der für die Beheizung von Gebäuden benötigt wird, werden in vielen Untersuchungen Wärmedämmung, Gebäudedichtheit, Gebäudekompaktheit, geringe transparente Flächen nach Nord, Ost und West, passive Sonnenenergienutzung in Verbindung mit den thermischen Speichermassen des Gebäudes und Abluftwärmerückgewinnung genannt (z. B. Balcomb, 1992; Treberspurg, 1998; Hausladen et al., 2005; Feist, 2007) .

Zur Reduktion des Kühlbedarfs von Gebäuden tragen die Reduktion transparenter Flächen, ausgerichtet nach Ost und West, eine bauliche und / oder aktive Außenverschattung der transparenten Flächen, thermische Speichermassen des Gebäudes in Verbindung mit einer Nachtlüftung (möglichst über Fenster), eine Wärmedämmung der der Sonne zugewandten Außenflächen und eine Reduktion der inneren Lasten durch energieeffiziente Geräte bei (siehe z. B. Reim, 2006; Treberspurg et al., 2006; Fink et al., 2002; Hausladen et al., 2005; Balcomb, 1992).

Eine richtige Kombination dieser Maßnahmen wird durch die oben beschriebenen gesetzlichen Rahmenbedingungen des

OIB und damit der Baugesetze vorgegeben. Weitere Adaptierungen dieser Rahmenbedingungen sind zu erwarten. Die Sommertemperaturen können aber auch im städtischen Kontext gesenkt werden, z. B. über gute Winddurchspülung der Stadtteile und einer dadurch besseren Wärmeabfuhr, durch die Farbgestaltung (helle Farben reflektieren mehr Solarstrahlung) (z. B. Menon et al., 2009) bzw. Begrünung, womit eine Verringerung des Kühlenergiebedarfs einhergeht. Während reflektierende Oberflächen sehr wohl zur Erwärmung gegenüberliegender Gebäude beitragen können, setzten Vegetationsoberflächen die eingestrahlte Energie in Wachstum und Verdunstung um. Dadurch wird die Oberfläche kühler gehalten, was zu geringeren Strahlungstemperaturen und einer dadurch verringerten Strahlungsbelastung auf die Umgebung führt. Zusätzlich halten Pflanzen durch Beschattung Sonnenstrahlung von der Gebäudefassade ab und verhindern auch so ihre Erwärmung. Durch Verwendung trockenresistenter Arten können auch mit sehr geringer oder fehlender aktiver Bewässerung messbare Effekte an Wänden und Fassaden erzielt werden. Je trockener eine Grünfassade oder ein Gründach wird, desto stärker erhöht sich wiederum seine Reflektivität (Trimmel et al., 2012). International wird dieses Thema unter dem Begriff „Urban Climate“ vielfach behandelt (z. B. International Journal on Urban Climate).

Der bisher stattgefundene Klimawandel führt bereits heute im Bereich der technischen Normen zu einer Anpassung. Hier sind z. B. die Anhebung der Normaußentemperatur für die Heizlastberechnung in der ÖNORM B8110-5 Beiblatt 1, die Erhöhung der Schneelasten zur Bemessung von Dächern oder die Anpassung von roten Zonen für die Bebauungspläne (siehe auch Band 2, Kapitel 6und Band 3, Kapitel 2) zu nennen. Testbedingungen für die Zertifizierung von Dächern, Fenstern, Fassaden, thermischen Solaranlagen und Photovoltaikanlagen sind in den technischen Regelwerken in Bezug auf Windlasten (Zug / Druck), Hagel und andere mechanische Einwirkungen, Schlagregen- und Winddichtheit, Schneelasten sowie thermische Belastungen fixiert. Diese Regelwerke sollten natürlich an die zu erwartenden Klimaänderungen adaptiert werden, da heute eingebaute Bauteile mindestens für die nächsten 20 Jahre in Betrieb bleiben, zumeist aber wesentlich länger (siehe z. B. Leibetseder et al., 2012; Prutsch et al., 2014).

5.2.6 Forschung und Entwicklung: Bedarf, Potenzial

Eine Verbesserung der Datenlage zum Gebäudebestand und dem Energieverbrauch ist insbesondere für Nichtwohngebäude notwendig. Zwar bietet die Statistik Austria (2011) erstmalige Energiebedarfsdaten für den Dienstleistungssektor, jedoch fehlen Angaben über die Größenverteilungen der Nichtwohngebäude.

Weiterer Forschungsbedarf ist auch für die Verbilligung und Vereinfachung der hochwertigen Gebäudesanierung gegeben. Es müssen kostengünstige Systeme entwickelt werden, welche die Sanierung der Gebäude bei durchgehender Bewohnung ermöglichen.

Im „Urban Climate“-Bereich (Städtebau, helle Farben, Gebäudebegrünung) wären Untersuchungen mit Bezug auf Österreich vonnöten, um eine Abschätzung der Temperaturreduktion durch solche Maßnahmen in den österreichischen Ballungsräumen sowie der dadurch erzielten Energie- und Emissionseinsparungen vornehmen zu können.

Detailliertere ökonomische Studien zur Abschätzung der Kosten und Nutzen umfassender hochwertiger Gebäudesanierung fehlen ebenfalls noch weitgehend, da sich die meisten Studien lediglich mit Einzelobjekten beschäftigen.

5.3 Literaturverzeichnis
5.3 References

Allplan GmbH, Verein deutscher Zementwerke e.V., 2007. Energieeffizienz der österreichischen Zementindustrie. (Projekt im Auftrag der Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie). Wien.

Amann, W., 2004. Soziale Wirkungsweise der Wohnbauförderung. Expertise im Auftrag des Grünen Parlamentsklubs. FGW. Wien.

Amt der Steiermärkischen Landesregierung, 2010. Klimaschutzplan Steiermark. Perspektive 2020/2030. 26 Maßnahmenbündel für eine zukunftssichernde Klimapolitik in der Steiermark. Graz.

Anderl, M., Bednar, W., Böhmer, S., Gössl, M., Gugele, B., Ibesich, N., Lampert, C., Lenz, K., Muik, B., Neubauer, C., Pazdernik, K., Pötscher, F., Poupa, S., Ritter, M., Schachermayer, E., Schodl, B., Schneider, J., Seuss, K., Sporer, M., Stix, S., Stoiber, H., Stranner, G., Storch, A., Wappel, D., Weiss, P., Wiesenberger, H., Winter, R., Zethner, G., Zechmeister, A., 2009. Klimaschutzbericht 2009 (REP-0226). Umweltbundesamt Wien, Wien.

Anderl, M., Bednar, W., Gössl, M., Göttlicher, S., Gugele, B., Ibesich, N., Jöbstl, R., Köther, T., Kuschel, V., Lampert, C., Neubauer, C., Pazdernik, K., Poupa, S., Purzner, M., Riegler, E., Schneider, J., Seuss, K., Sporer, M., Stranner, G., Storch, A., Weiss, P., Wiesenberger, H., Winter, R., Zechmeister, A., Zethner, G., Kommunalkredit Public Consulting GmbH, 2011. Klimaschutzbericht 2011 (REP-0334). Umweltbundesamt, Wien.

Anderl, M., Gangl, M., Ibesich, N., Pazdernik, K., Poupa, S., Purzner, M., Zechmeister, A., 2011a. Bundesländer Luftschadstoff-Inventur 1990–2009. Regionalisierung der nationalen Emissionsdaten auf Grundlage von EU-Berichtspflichten (Datenstand 2011). (REP-0352). Umweltbundesamt, Wien.

Anderl, M., Bednar, W., Fischer, D., Gössl, M., Heller, C., Jobstmann, H., Ibesich, N., Köther, T., Kuschel, V., Lampert, C., Neubauer, C., Pazdernik, K., Perl, D., Poupa, S., Purzner, M., Riegler,

E., Schenk, C., Schieder, W., Schneider, J., Seuss, K., Sporer, M., Schodl, B., Stoiber, H., Storch, A., Weiss, P., Wiesenberger, H., Winter, R., Zechmeister, A., Zethner, G., 2012. Klimaschutzbericht 2012 (REP-0391). Umweltbundesamt, Wien.

Anderl, M., Gangl, M., Ibesich, N., Pazdernik, K., Poupa, S., Purzner, M., Zechmeister, A., 2012a. Bundesländer Luftschadstoff-Inventur 1990–2010. Regionalisierung der nationalen Emissionsdaten auf Grundlage von EU-Berichtspflichten (Datenstand 2012). (REP-0400). Umweltbundesamt, Wien.

Arnsfeld, S., Babich, A., Senk, D., 2012. Einsatz torrefizierter Biomasse im Hochofen., in: Senk, D. (Ed.), Tagungsband Zum 27. Aachener Stahlkolloquium Metallurgie, „Effizienz durch Präzision", 13.-14.09.2012. printproduction M. Wolff, Aachen, pp. 29–38.

Austria Glas Recycling, 2012. Aus Kontinuität wächst Nachhaltigkeit. Aktualisierte Umwelterklärung, Nachhaltigkeitsbericht 2012. Austria Glas Recycling GmbH.

Austrian Standards Institute, 2000. ÖNORM B 8110-1: Wärmeschutz im Hochbau – Anforderungen an den Wärmeschutz und Nachweisverfahren.

Balcomb, J.D., 1992. Passive solar buildings, Solar Heat Technologies. MIT Press, Cambridge, Massachusetts; London, UK.

Beekes, M., Cremers, M., 2012. Torrefaction Cracks the Biomass Challenge. Emerging technology to convert biomass into „bio-coal" could overcome current limits on co-firing organic materials with coal. [WWW Document]. Renewable Energy World. URL http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2012/06/torrefaction-cracks-the-biomass-challenge (accessed 6.23.14).

Berger, T., 2012. Impacts of climate change upon sustainable heating and cooling strategies of office buildings in urban areas. Dissertation. Universität für Bodenkultur, Wien.

BgBl, 2009. II, Nr. 251/2009: Vereinbarung gemäß Art. 15a. B-VG zwischen dem Bund und den Ländern über Maßnahmen im Gebäudesektor zum Zweck der Reduktion des Ausstoßes an Treibhausgasen.

BGBl, 2011. 106. Bundesgesetz zur Einhaltung von Höchstmengen von Treibhausgasemissionen und zur Erarbeitung von wirksamen Maßnahmen zum Klimaschutz (Klimaschutzgesetz – KSG). Ausgegeben am 21. November 2011.

BgBl, 2012. I, Nr. 27/2012: Bundesgesetz über die Pflicht zur Vorlage eines Energieausweises beim Verkauf und bei der In-Bestand-Gabe von Gebäuden und Nutzungsobjekten (Energieausweis-Vorlage-Gesetz 2012 – EAVG 2012).

Bliem, M., Friedl, B., Balabanov, T., Zielinska, I., 2011. Energie [R] evolution Österreich 2050 (Projektbericht; Studie im Auftrag von EVN, Greenpeace Zentral- und Osteuropa und Gewerkschaft vida). Institut für Höhere Studien (IHS), Wien.

BMLFUW, 2013. UFI – Umweltförderung im Inland [WWW Document]. URL http://www.bmlfuw.gv.at/umwelt/klimaschutz/ufi/ufi.html (accessed 6.24.14).

BMFLUW, BMWFJ, 2010. Energiestrategie Österreich, Wien.

BMLFUW, BMWFJ, 2011. Ressourcennutzung in Österreich – Bericht 2011, Wien.

BMWFJ, 2010. Nationaler Aktionsplan 2010 für erneuerbare Energie für Österreich (NREAP-AT) (Aktionsplan gemäß der Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates). Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, Wien.

BMWFJ, 2012. Energiestatus Österreich 2012. Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, Wien.

Brunner, P.H., 2011. Urban mining a contribution to reindustrializing the city. Journal of Industrial Ecology 15, 339–341. doi:10.1111/j.1530-9290.2011.00345.x

CEPI, 2011. Unfold the Future – The Forest Fibre Industry: 2050 Roadmap to a low carbon bio-economy. Confederation of European Paper Industries, Brussels.

Christian, R., 2011. Zukunftsfähige Energieversorgung für Österreich (ZEFÖ) (KLIEN Projekt im Rahmen der Ausschreibung „Energiesysteme der Zukunft" des BMVIT). Umweltmanagement Austria, Institut für industrielle Ökologie und Forum Wissenschaft & Umwelt.

Christian, R., Feichtinger, R., Christian, R., Bolz, R., Windsberger, A., Hummel, P., Weish, P., Pfnier, E., 2011. Zukunftsfähige Energieversorgung für Österreich (No. 13/2011), Berichte aus Energie- und Umweltforschung. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien.

E-Bridge Consulting GmbH, 2005. KWK – Potentiale in Österreich. Studie erstellt im Auftrag von Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, Industriellenvereinigung, Verband der Elektrizitätsunternehmen Österreichs sowie Wirtschaftskammer Österreich, Villach.

Eco World Styria, 2012. Erfolg bei FFG-Förderschiene für „Landfill Mining Styria". Pressemitteilung 11.12.2012.

ECOHEATCOOL, 2006. The European Heat Market, Work Package 1 (Final Report). Euroheat & Power.

Eikmeier, B., Gabriel, J., Schulz, W., Krewitt, W., Nast, M., 2005. Analyse des nationalen Potenzials für den Einsatz hocheffizienter KWK, einschliesslich hocheffizienter Kleinst-KWK, unter Berücksichtigung der sich aus der EU-KWK-RL ergebenden Aspekte (Endbericht zum Forschungsvorhaben Projekt I A 2 – 37/05 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit, Berlin). Bremer Energie Institut und Institut für Technische Thermodynamik, Abt. Systemanalyse und Technikbewertung, Stuttgart;, Berlin.

Ekebro, I., 2011. Minderung des Ölverbrauchs um 80%., in: SCA Umweltbericht 2011. Druckpapiere Und Zellstoff. SCA Forest Products, Sundsvall, Schweden.

Europäische Gemeinschaften, 2007. Vision 2020 – Energie sparen! Europäische Kommission, GD Energie und Verkehr, Brüssel.

Europäische Kommission, 2011. KOM(2011) 112: Fahrplan für den Übergang zu einer wettbewerbsfähigen CO_2-armen Wirtschaft bis 2050. Mitteilungen der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. 8.3.2011. Brüssel.

Europäische Union, 2002. Richtlinie 2002/91/EU: Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden, Energy Performance of Buildings Directive, Europäisches Parlament und Rat vom 16. Dezember 2002, L1/65.

Europäische Union, 2003. Richtlinie 2003/87/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Oktober 2003 über ein System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten in der Gemeinschaft und zur Änderung der Richtlinie 96/61/EG des Rates.

Europäische Union, 2004. Richtlinie 2004/8/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11.2.2004 über die Förderung einer am Nutzwärmebedarf orientierten Kraft-Wärme-Kopplung im Energiebinnenmarkt und zur Änderung der Richtlinie 92/42/EWG, L52/50.

Europäische Union, 2009. Richtlinie 2009/29/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom vom 23. April 2009 zur Änderung der Richtlinie 2003/87/EG zwecks Verbesserung und Ausweitung des Gemeinschaftssystems für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten, L 140/63.

Europäische Union, 2010. Richtlinie 2010/31/EU: Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden, Energy Performance of Buildings Direc-

tive, Europäisches Parlament und Rat vom 19 Mai 2010 (Neufassung).
European Climate Foundation, 2010. Roadmap 2050 – A practical guide to a prosperous. Low-carbon Europe.
European Commission, 2013. COM(2013) 180: The Future of Carbon Capture and Storage in Europe. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee of the Regions. 27.3.2013. European Commission, Brussels.
European Union, 2010. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast).
EWG, 1989. Richtlinie 89/106/EWG des Rates vom 21. Dezember 1988 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten über Bauprodukte.
Fachverband der Gießereiindustrie, 2011. Jahresbericht 2010. Wirtschaftskammer Österreich, Wiedner Hauptstraße 63, 1045 Wien.
Fachverband der Glasindustrie, 2011. Jahresbericht 2010. Wirtschaftskammer Österreich, Wiedner Hauptstraße 63, 1045 Wien.
FCIO, undated. Die chemische Industrie – unverzichtbar beim Klimaschutz. (Informationsfolder). Fachverband der Chemischen Industrie Österreichs – FCIO, Wiedner Hauptstraße 63, 1045 Wien.
Feist, W., 2007. Das Niedrigenergiehaus: neuer Standard für energiebewusstes Bauen. Müller, Heidelberg.
Fink, C., Blümel, E., Kouba, R., Heimrath, R., 2002. Passive Kühlkonzepte für Büro- und Verwaltungsgebäude mittels luft- bzw. wasserdurchströmten Erdreichwärmetauschern (No. 35/2002), Berichte aus Energie- und Umweltforschung. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien.
Frischenschlager, H., Karigl, B., Lampert, C., Pölz, W., Schindler, I., Tesar, M., Wiesenberger, H., Winter, B., 2010. Klimarelevanz ausgewählter Recyling-Prozesse in Österreich (REP-0303). Umweltbundesamt, Wien.
Gobiet, A., Toeglhofer, C., Truhetz, H., Habsburg-Lothringen, C., Prettenthaler, F., Heimrath, R., Michlmair, M., Schranzhofer, H., Streicher, W., 2009. HEAT.AT. Die Auswirkungen des Klimwandels auf Heiz-und Kühlenergiebedarf in Österreich II (Endbericht 2. Jahr). Österreichische Akademie der Wissenschaften, Wien.
Graubner, C.-A., Knauff, A., 2008. Ökobilanzstudie – Gegenüberstellung Massivhaus / Holzelementbauweise an einem KfW Energiesparhaus 40 (Forschungsbericht F04-8-2008). Fachgebiet Massivbau, Fachbereich 13, Bauingenieurwesen und Geodäsie, TU Darmstadt, Darmstadt.
Hausladen, G., Saldanha, M. de, Sager, C., Liedl, P., 2005. ClimaDesign: Lösungen für Gebäude, die mit weniger Technik mehr können. Callwey Verlag, München.
Heilo Media, 2013. Europa Info Shop: Österreich [WWW Document]. URL http://www.europa-infoshop.de/Die_Union/Lander/EU-Mitgliedsstaaten/Osterreich/osterreich.html (accessed 6.24.14).
Holzer, P., Hofstätter, M., 2011. Bauen 2020 – Gebäudesystemvergleich. Wissenschaftliche Studie über den analytischen Vergleich unterschiedlicher Gebäudesysteme. (Schlussbericht). im Auftrag der Niederösterreichischen Landesregierung, Geschäftsstelle für Energiewirtschaft und des Bau.Energie.Umwelt.Cluster Niederösterreich, Krems.
ICCA, 2009. Innovations for Greenhouse Gas Reductions. A life cycle quantification of carbon abatement solutions enabled by the chemical industry. International Council of Chemical Associations, Brussels.
IEA, 2009. Energy Technology Transitions for Industry – Strategies for the Next Industrial Revolution. International Energy Agency, Paris.
IEA, 2012. Technology Roadmap Solar Heating and Cooling Program. Internatinal Energy Agency, Paris.
IEA, 2014. Energy efficiency [WWW Document]. URL http://www.iea.org/aboutus/faqs/energyefficiency/ (accessed 6.27.14).
IPCC, 2000. Summary for Policymakers.Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Geneva, Switzerland.
IRCC, 1998. Guidelines for the Introduction of Performance-Based Building Regulations. Inter-Jurisdictional Regulatory Collaboration Committee (IRCC).
Jähnig, D., Weiß, W., 2007. Design Guidelines – Solar Space Heating of Factory Buildings. AEE INETC, Gleisdorf, Austria.
Karner, A., Schleicher, S., 2010. Thermische Gebäudesanierung nutzt Umwelt und Wirtschaft. Erfahrungen mit dem Sanierungsscheck 2009 und Perspektiven für eine Fortsetzung. Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung, Wegener Zentrum für Klima und Globalen Wandel, KWI Consultants GmbH.
Kletzan, D., Köppl, A., Schleicher, S., Thenius, G., Gebetsroither, B., Steininger, K., Türk, A., Vetters, N., Streicher, W., Eder, K., Dunkel, G., Stockmayer, M., 2006. Innovation & Klima – Innovative Klimastrategien für die österreichische Wirtschaft. (Endbericht im Auftrag der Wirtschaftskammer Österreich, der Industriellenvereinigung, des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit und des Verbands der Elektrizitätsunternehmen Österreichs), Wien.
Köppl, F., 2001. Klimaschutz durch Gebäudesanierung – Möglichkeiten und Grenzen des Wohnrechtes. Referat anlässlich der gleichnamigen Energiegespräche am 5.6.2001.
Köppl, A., Kettner, C., Kletzan-Slamanig, D., Schleicher, S., Schnitzer, H., Titz, M., Damm, A., Steininger, K., Wolkinger, B., Lang, R., Wallner, G., Artner, H., Karner, A., 2011. Energy-Transition 2012\2020\2050 Strategies for the Transition to Low Energy and Low Emission Structures. (2011/019-2/S/WIFO-Projektnummer: 7407). Austrian Institute of Economic Research, Graz University of Technology, Institute for Process and Particle Engineering, University of Graz, Wegener Center for Climate and Global Change, Johannes Kepler University Linz, Institute for Polymeric Materials and Testing, KWI Consultants GmbH, Wien.
Laing, T., Sato, M., Grubb, M., Comberti, C., 2013. Assessing the effectiveness of the EU Emissions Trading System. Centre for Climate Change Economics and Policy, Working Paper No. 126; Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment, Working Paper No. 106.
Lebensministerium (BMFLUW), 2002. Strategie Österreichs zur Erreichung des Kyoto-Ziels. Klimastrategie 2008 / 2012. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
Lebensministerium (BMFLUW), 2007. Anpassung der Klimastrategie Österreichs zur Erreichung des Kyoto-Ziels 2008-2012. Vorlage zur Annahme im Ministerrat am 21. März 2007. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
Lebensministerium (BMFLUW), 2013. Maßnahmen im Gebäudesektor und Kyoto-Finanzierung 2011 (Zusammenfassender Bericht des Bundes und der Länder über die Wirkungen von Maßnahmen zur Treibhausgas-Emissionsreduktion im Rahmen der Vereinbarung über Maßnahmen im Gebäudesektor), Wien.

Leggett, J., Pepper, W.J., Swart, R.J., 1992. Emissions Scenarios for the IPCC: an Update, in: Houghton, J.T., Callander, B.A., Varney, S.K. (Eds.), Climate Change 1992. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 69–95.

Leibetesedert, M., Schmiedinger, B., Oberhuber, A., Liepert, P., Mayr, H., Schober, P., Steigenberger, J., Ecklmayr, R., Guggenberger, T., Moser, J., Prirschl, G., Balkenhol, R., 2012. Ergänzung zum ACR Innovations-Radar 2012, Teil 1; FEI-Schwerpunkt: Nachhaltiges Bauen. Austrian Cooperative Research (ACR).

Maydl, P., Eustacchio, E., Passer, A., 2010. Die Umsetzung der Grundanforderung Nr. 7 in der künftigen Bauprodukteverordnung. OIB aktuell – Das Fachmagazin für Baurecht und Technik 16–23.

Menon, S., Akbari, H., Mahanama, S., Sednev, I., Levinson, R., 2010. Radiative forcing and temperature response to changes in urban albedos and associated CO_2 offsets. Environmental Research Letters 5. doi:10.1088/1748-9326/5/1/014005

Mikulits, R., 2009. Die Umsetzung der OIB-Richtlinien in den Bundesländern. Perspektiven Heft 1_212009.

Mikulits, R., 2011. Die neue EU-Bauprodukteverordnung. OIB aktuell – Das Fachmagazin für Baurecht und Technik 10–15.

Ministry of Economic Affairs, 2008. Action Plan Process Intensification. The Netherlands.

Moidl, S., Wahlmüller, J., 2012. Österreichs Unternehmen im Emissionshandel (Emission Trading Scheme – ETS) Profiteure. Verlierer. Klimaschutz? (KLIMA Hintergrundpapier.). Global 2000, Wien.

Müller, T., Weiß, W., Schnitzer, H., Brunner, C., Begander, U., Themel, O., 2004. PROMISE – Produzieren mit Sonnenenergie. Potenzialstudie zur thermischen Solarenergienutzung in österreichischen Gewerbe- und Industriebetrieben. (Endbericht), „Fabrik der Zukunft" eine Initiative des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT), Gleisdorf und Graz.

Müller, A., Biermayr, P., Kranzl, L., Haas, R., Altenburger, F., Bergmann, I., Friedl, G., Haslinger, W., Heimrath, R., Ohnmacht, R., Weiss, W., 2010. Heizen 2050: Systeme zur Wärmebereitstellung und Raumklimatisierung im österreichischen Gebäudebestand: Technologische Anforderungen bis zum Jahr 2050. (Endbericht. Gefördert vom Klima- und Energiefonds. No. 814008). TU-Wien, Energy Economics Group, Bioenergy 2020+, Wien.

Muñoz, P., Steininger, K.W., 2010. Austria's CO_2 responsibility and the carbon content of its international trade. Ecological Economics 69, 2003–2019. doi:10.1016/j.ecolecon.2010.05.017

Muster-Slawitsch, B., Brunner, C., Ribeiro de Lima, D., Schnitzer, H., 2010. The green brewery concept – energy efficiency and the use of renewable energy sources in breweries. Presented at the 19th International Congress of Chemical and Process Engineering – CHISA, Prague.

OIB-Österreichisches Insitut für Bautechnik, 2007. Leitfaden Energietechnisches Verhalten von Gebäuden. (Version 2.6). Österreichisches Insitut für Bautechnik.

OIB-Österreichisches Insitut für Bautechnik, 2007. Richtlinie 6; Energieeinsparung und Wärmeschutz.

OIB-Österreichisches Insitut für Bautechnik, 2011. Richtlinie 6; Energieeinsparung und Wärmeschutz.

Papsch, F., 2012. Persönliche Mitteilung. Fachverband der Stein- und keramischen Industrie.

Passer, A., Kreiner, H., Kainz, F., 2009. Gebäudebewertung im Kontext zu technischen und funktionalen Qualitäten – Ein Diskussionsbeitrag. OIB aktuell – Das Fachmagazin für Baurecht und Technik.

Passer, A., Kreiner, H., Cresnik, G., Maydl, P., 2010. Genormte Nachhaltigkeit?, in: Nachhaltige Gebäude – Planung, Betrieb und Bewertung. Internationaler Kongress e-nova, Austria, pp. 25–33.

Peters, G.P., Davis, S.J., Andrew, R., 2012. A synthesis of carbon in international trade. Biogeosciences 9, 3247–3276. doi:10.5194/bg-9-3247-2012

Prutsch, A., Felderer, A., Balas, M., König, M., Steurer, R., 2014. Methoden und Werkzeuge zur Anpassung an den Klimawandel. Ein Handbuch für Bundesländer, Regionen und Städte. Umweltbundesamt, Wien.

Reim, T.R., 2006. Klimatechnische Analyse zum Sommerfall im Wohnbau. Kühlstrategien, Minimierung des Wärmeeintrags, thermische Optimierung historischer Kastenfenster. Dissertation. Universität für Bodenkultur, Wien.

Rifkin, J., 2011. Die dritte industrielle Revolution: die Zukunft der Wirtschaft nach dem Atomzeitalter. Campus-Verlag, Frankfurt am Main.

Schnitzer, H., 2013. Die Lebensmittelindustrie der Zukunft: CO_2-neutral und wettbewerbsfähig.

Schnitzer, H., Schmied, J., Titz, M., Jägerhuber, P., Enzi, C., Filzwieser, P., 2012. Abwärmekataster der steirischen Industrie. Steiermärkische Landesregierung, Graz.

Schriefl, E., 2007. Modellierung der Entwicklung von Treibhausgasemissionen und Energieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser im österreichischen Wohngebäudebestand unter der Annahme verschiedener Optimierungsziele. Dissertation. Technische Universität Wien, Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft, Wien.

Statistik Austria (2004), Gebäude- und Wohnungszählung 2001, Bundesanstalt Statistik Österreich, Wien.

Statistik Austria, 2008. Einteilung des Endenergiebedarfs nach Nutzenergiekategorien, Wien.

Statistik Austria, 2009a. Nutzenergieanalyse (NEA) 2008, Wien.

Statistik Austria, 2009b. Energiestatistik: Strom- und Gastagebuch 2008, Wien.

Statistik Austria, 2011. Energieeinsatz im Dienstleistungssektor. Statistik Austria, Bundesanstalt Statistik Österreich, Direktion Raumwirtschaft, Energie, Wien.

Statistik Austria, 2012. Statistik Austria Superweb, Datenbanken. STATcube [WWW Document]. URL http://sdb.statistik.at/superwebguest/login.do?guest=guest&db=deeehh (accessed 6.23.14).

Statistik Austria, 2012a. Luftemissionsrechnung, NAMEA. [WWW Document]. URL http://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_und_umwelt/umwelt/namea/index.html (accessed: 09.06. 12.)

Statistik Austria, 2013. Mikrozensus ab 2004 [WWW Document]. URL http://www.statistik.at/web_de/frageboegen/private_haushalte/mikrozensus/index.html (accessed 6.23.14).

Statistik Austria, 2013a. Bestand an Gebäuden und Wohnungen [WWW Document]. URL http://www.statistik.at/web_de/statistiken/wohnen_und_gebaeude/bestand_an_gebaeuden_und_wohnungen/index.html (accessed 9.18.13).

Statistik Austria 2014, Entwicklung der ÖNACE 2008 [WWW Dolument]. URL http://www.statistik.at/web_de/klassifikationen/oenace_2008_implementierung/entwicklung_der_oenace_2008/index.html#index4 (accessed 6.29.14)

Streicher, W., Haas, R., Hausberger, S., Oblasser, S., Schnitzer, H., Steininger, K.W., Tatzber, F., Titz, M., Heimrath, R., Kalt, G., Damm, A., Wetz, I., 2010. Energieautarkie für Österreich 2050 (Feasibility Study, Endbericht No. B068644, abgewickelt über

den Klima- und Energiefonds.). im Auftrag des österreichischen Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (Lebensministerium), Wien.
Treberspurg, M., 1998. Neues Bauen mit der Sonne: Ansätze zu einer klimagerechten Architektur, Auflage: 2., aktualisierte u. erw. Aufl. Springer, Wien; New York.
Treberspurg, M., Streicher, W., Reim, T., Hofbauer, W., 2006. Sommertauglichkeit im Wohnbau, Sommerlichkeit und Behaglichkeit mit umweltverträglichen und CO_2 neutralen Kühlstrategien. Projekt im Auftrag vom Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.
Trimmel, H., Hagen, K., Mursch-Radlgruber, E., Scharf, B., Weihs, P., 2012. The influence of vegetation on the energy balance within urban settlements. Presented at the 13.Klimatag 14–15 Juni 2012, Institut für Meteorologie, Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau BOKU Wien und Fachbereich Landschaftsplanung und Gartenkunst, Universität für Bodenkultur, Wien.
Wegener Zentrum, TU Graz, Joanneum Research, 2010. Erläuterungen zum Klimaschutzplan Steiermark 2010 Teil 2 – Gebäude (Studie im Auftrag der Steiermärkischen Landesregierung), Graz.
WIFO, 2013. EU-Emissionshandel: Überschuss an Emissionszertifikaten in der Kyoto-Periode. Presseinformation vom 3. April 2013.

5.4 Anhang
5.4 Annex

5.4.1 Anhang 1

2010 gültige Gesetze und Verordnungen des Bundes und der österreichischen Bundesländer zur Implementierung der EU-Gebäuderichtlinie des Energiebedarfs

Bund

- Energieausweis Vorlage Gesetz

Burgenland

- MNE(2008)53353 v. 12.5.2008 – Burgenländische Baugesetz-Novelle 2008, LGBI. Nr.53/2008 vom 29.5.2008
- MNE(2008)54011 v. 28.7.2008 – Burgenländische Bauverordnung 2008, LGBI. Nr. 53/2008 vom 27.5.2008 noch offen: Luftreinhalte· und Heizungsanlagengesetz

Kärnten

- MNE(2008)51537 v. 7.3.2008 – Gesetz, mit dem die Kärntner Bauvorschriften geändert werden,LGBI Nr. 10/2 008 v. 19.2.2008
- MNE(2008)54008 v. 28.7.2008 – Gesetz, mit dem das Kärntner Heizungsanlagengesetz geändert wird, LGBI. Nr. 34/2008 v. 24.5.2008

Niederösterreich

- NÖGEEV 2008

Oberösterreich

- 4.9.5/312/03 v. 12.9.2003 – Verordnung über den Energieausweis von Bauten, LGBI. Nr. 55/ 2003 v. 18.8.2003
- MNE(2005)50950 v. 13.2.2005 – Heizungsanlagen- und Brennstoffverordnung, LGBI Nr. 7/ 2005 v. 31.1.2005
- MNE(2005)58554 v. 15.12.2005 – Bautechnikgesetz-Novelle 1998, LGBI Nr. 103/1998 v. 18.12.1998
- MNE(2005)58555 v. 15.12.2005 – Bautechnikverordnungs-Novelle 1999, LGBI Nr. 59/1999 v.30.7.1999
- MNE(2005)58557 v. 15.12.2005 – OÖ. Luftreinhalte· und Energietechnikgesetz 2002, LGBI Nr. 114/2002 v. 28.11.2002
- MNE(2008)52877 v. 19.5.2008 – OÖ. Bauordnungs-Novelle 2008, LGBI Nr. 35/ 2008 v. 31.3.2008
- MNE(2008)52878 v. 19.5.2008 – OÖ. Bautechnikgesetz-Novelle 2008, LGBI Nr. 34/2008 v. 31.3.2008
- noch offen: Notifizierung der OÖ. Bautechnikverordnungs-Novelle 2008, LGBI Nr. 110/2008 v. 17.12.2008 und der OÖ. Luftreinhalte- und Energietechnikgesetz-Novelle 2008

Salzburg

- 4.9.5/312/03 v. 12.9.2003 – Verordnung über den Energieausweis von Bauten, LGBI. Nr. 55/2003 v. 18.8.2003

Steiermark

- MNE(2008)54013 v. 28.7.2008 – Steiermärkische Baugesetz und das Steiermärkische Feuerungsanlagengesetz, LGBI. Nr. 27 vom 1.4.2008
- MNE(2008)54014 v. 28.7.2008 – Steiermärkische Energieeinsparungs-·und Wärmeschutzverordnung, LGBI. Nr. 51 vom 4.7.2008
- 2008 MNE(2008)5401 5 v. 28.7. 2008 – Steiermärkische Feuerungsanlagen V, LGBI. Nr. 52 vom 4.7. 2008

Tirol

- MNE(2008)50234 v. 9.1.2008 – Tiroler Bauordnung 2001, LGBI Nr. 73/ 2007 v. 4.12.2007
- MNE(2008)50235 v. 9.1.2008 – Technischen Bauvorschriften 1998, LGBINr. 93/ 2007 v. 27.12.2007
- MNE(2008)50234 v. 9.1.2008 – T Bauordnung 2001, LGBI. Nr.73/2007 vom 04.12.2007
- MNE(2008)50235 v. 9. 1.2008 – Technische Bauvorschriften 2008, LGBI. Nr. 93/2007 vom 27.12. 2007

- noch offen: Novelle zum Tiroler Heizungsanlagengesetz 2000; Tiroler Gasgesetz 2000

Vorarlberg

- MNE(2007)55439 v. 2.8.2007 – Gesetz über eine Änderung des Baugesetzes, LGBI Nr. 44/2 007 v. 12.7.2007
- MNE(2008)50231 v. 9.1.2008 – BautechnikV, LGBI Nr 83/2007 v. 20.12.2007
- MNE(2008)50232 v. 9.1.2008 – Baueingabeverordnung, LGBI Nr 84/ 2007 v. 20.12.2007
- MNE(2008)50233 v. 9.1.2008 – Luftreinhalteverordnung, LGBI Nr 85/ 2007 v. 20.12.2007

Wien

- MNE(2007)57530 v. 25.10.2007 – Wiener Feuerpolizei und Luftreinhaltegesetz, LGBI Nr. 35/2007 v. 7.9.2007
- MNE(2008)52529 v. 30.4.2008 – Techniknovelle 2007, LGBI Nr. 24 v. 11.4.2008
- MNE(2008)51588 v. 7.3.2008 – Gesetz, mit dem das Wiener Feuerpolizei-, Luftreinhalte- und Klimaanlagengesetz – WFLKG geändert wird, LGBI Nr. 12 v. 22.2.2008
- MNE(20 08)5324 2 v. 5.5.2008 – Wiener Bautechnikverordnung – WBTV, LGBI Nr. 31 v. 3.5.2008

5.4.2 Anhang 2

U-Wert Vorgaben, Primärenergiebedarf und Klasseneinteilung des österreichischen Energieausweises

Tabelle 5.A1 Mindest-U-Werte der OIB Richtlinie 6 (2011)
Table 5.A1 Minimum allowed U-vaules OIB Richtlinie 6 (2011)

Bauteil		U-Wert (W / m² K)
Wände	gegen Außenluft	0,35
	gegen unbeheizte oder nicht ausgebaute Dachräume	0,35
	gegen unbeheizte, frostfrei zu haltende Gebäudeteile (ausgenommen Dachräume) sowie gegen Garagen	0,60
	erdberührt	0,40
	(Trennwände) zwischen Wohn- oder Betriebseinheiten	0,90
	gegen andere Bauwerke an Grundstücks- bzw. Bauplatzgrenzen	0,50
	kleinflächig gegen Außenluft (z. B. bei Gaupen), die 2 % der Wände des gesamten Gebäudes gegen Außenluft nicht überschreiten, sofern die Ö-NORM B8110-2 (Kondensatfreiheit) eingehalten wird	0,70
	(Zwischenwände) innerhalb von Wohn- und Betriebseinheiten	-
Fenster, Fenstertüren, verglaste Türen	jeweils in Wohngebäuden (WG) gegen Außenluft[2]	1,40
	jeweils in Nicht-Wohngebäuden (NWG) gegen Außenluft[2]	1,70
sonstige transparente Bauteile	vertikal gegen Ausßenluft[1]	1,70
	TRANSPARENTE BAUTEILE horizontal oder in Schrägen gegen Außenluft[2]	2,00
	TRANSPARENTE BAUTEILE vertikal gegen unbeheizte Gebäudeteile[1]	2,50
Dachflächenfenster	gegen Außenluft[2]	1,70
Türen	unverglast, gegen Außenluft[2]	1,70
	unverglast, gegen unbeheizte Gebäudeteile[2]	2,50
Tore	Rolltore, Sektionaltore und dergleichen gegen Außenluft	2,50
Innentüren		-
Decken und Dachschrägen	jeweils gegen Außenluft und gegen Dachräume (durchlüftet oder ungedämmt)	0,20
Decken	gegen unbeheizte Gebäudeteile	0,40
	gegen getrennte Wohn- und Betriebseinheiten	0,90
	innerhalb von Wohn- und Betriebseinheiten	-
	über Außenluft (z. B. über Durchfahrten, Parkdecks)	0,20
	gegen Garagen	0,30
Böden	erdberührt	0,40

[1] Die Konstruktion ist auf ein Prüfnormmaß von 1,23 m × 1,48 m zu beziehen, wobei die Symmetrieebenen an den Rand des Prüfnormmaßes zu legen sind
[2] Bezogen auf ein Prüfnormmaß von 1,23 m × 1,48 m

Tabelle 5.A2 Primärenergie und CO_2-Konversionsfaktoren (OIB Richtlinie 6, 2011)

Table 5.A2 Conversion factors for primary energy and CO_2-emissions

Energieträger	f_{PE} (-)	$f_{PE, n.ern.}$ (-)	$f_{PE, ern.}$ (-)	f_{CO2} (g/kWh)
Kohle	1,46	1,46	0,00	337
Heizöl	1,23	1,23	0,00	311
Erdgas	1,17	1,17	0,00	236
Biomasse	1,08	0,06	1,02	4
Strom (Österreich-Mix)	2,62	2,15	0,47	417
Fernwärme aus Heizwerk (erneuerbar)	1,60	0,28	1,32	51
Fernwärme aus Heizwerk (nicht erneuerbar)	1,52	1,38	0,14	291
Fernwärme aus hocheffizienter KWK[1] (Defaultwert)	0,92	0,20	0,72	73
Fernwärme aus hocheffizienter KWK[1] (Bestwert)	≥ 0,30	gemäß Einzelnachweis[2]		
Abwärme (Defaultwert)	1,00	1,00	0,00	20
Abwärme (Bestwert)	≥ 0,30	gemäß Einzelnachweis[2]		

[1] Als hocheffiziente Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) werden all jene angesehen, die der Richtlinie 2004/8/EG entsprechen.

[2] Für den Fall, dass ein Einzelnachweis gemäß EN 15316-4-5 durchgeführt wird, dürfen keine kleineren Werte als für Abwärme (Bestwert) verwendet werden.

Tabelle 5.A3 Einteilung und Klassen (OIB Richtlinie 6, 2011)

Table 5.A3 Classification (OIB Richtlinie 6, 2011)

Klasse	Einstufung			
	$HWB_{BGF, SK}$ (kWh/m² a)	$PEB_{BGF, SK}$ (kWh/m² a)	$CO_{2, BGF, SK}$ (kg/m² a)	f_{GEE}
Klasse A++	≤ 10	≤ 60	≤ 8	≤ 0,55
Klasse A+	≤ 15	≤ 70	≤ 10	≤ 0,70
Klasse A	≤ 25	≤ 80	≤ 15	≤ 0,85
Klasse B	≤ 50	≤ 160	≤ 30	≤ 1,00
Klasse C	≤ 100	≤ 220	≤ 40	≤ 1,75
Klasse D	≤ 150	≤ 280	≤ 50	≤ 2,50
Klasse E	≤ 200	≤ 340	≤ 60	≤ 3,25
Klasse F	≤ 250	≤ 400	≤ 70	≤ 4,00
Klasse G	> 250	> 400	> 70	> 4,00

$HWB_{BGF, SK}$ *Heizwärmebedarf (Nutzenergie) bezogen auf Bruttogeschossfläche (BGF) und Standortklima (SK)*

$PEB_{BGF, SK}$ *Primärenergiebedarf bezogen auf Bruttogeschossfläche (BGF) und Standortklima (SK)*

$CO_{2, BGF, SK}$ *Kohlendioxidemissionen bezogen auf Bruttogeschossfläche (BGF) und Standortklima (SK)*

f_{GEE} *Gesamtenergieeffizienz-Faktor*

Tabelle 5.A4 Österreichischen Mindestanforderungen der Wohnbauförderung für Wärmeschutzstandards für Neubau und Sanierung (Art. 15a B-VG: BgBl, 2009)

Table 5.A4 Minimal Austrian insulation requirements for residential housing subsidies for new buildings and refurbishment (Art. 15a B-VG: BgBl, 2009)

	bei einem A/V[1]-Verhältnis ≥ 0,8[2]	**bei einem A/V-Verhältnis ≤ 0,2[2]**
Neubau Wohngebäude	HWB_{BGF} in kWh/(m^2 a)	HWB_{BGF} in kWh/(m^2 a)
bis Ende 2009	65	35
ab 1.1.2010	45	25
ab 1.1.2012	36	20
Sanierung Wohngebäude		
bis Ende 2009	80	43
ab 1.1.2010	75	35
Neubau öffentl. Gebäude		
ab 1.1.2010	15	8
ab 1.1.2012	12	7
Sanierung öffentl. Gebäude		
ab 1.1.2010	27	14
ab 1.1.2012	25	12

[1] A/V: Verhältnis Außenoberfläche zu Volumen des Gebäudes
[2] zwischen den Werten ist linear zu interpolieren

Band 3 Kapitel 6: Transformationspfade
Volume 3 Chapter 6: Transformation Paths

Koordinierende LeitautorInnen
Sigrid Stagl, Niels Schulz

LeitautorInnen
Angela Köppl, Kurt Kratena, Reinhard Mechler, Elke Pirgmaier, Klaus Radunsky, Armon Rezai

Beiträge von
Bano Mehdi

Für den Begutachtungsprozess
Sabine Fuss

Inhalt

ZUSAMMENFASSUNG

Klimawandel findet statt und mit größter Wahrscheinlichkeit ist er überwiegend anthropogen verursacht (siehe Band 1, Kapitel 1). Dieses Kapitel behandelt die Herausforderung den Klimawandel bei einem Temperaturanstieg von 2 °C zu stabilisieren und untersucht, welche Rolle Vermeidung und Anpassung in Österreich bei der Erreichung dieses globalen Ziels spielt. Zudem werden die positiven weiterführenden Auswirkungen einer sozio-ökologischen Transformation analysiert.

In der Vereinbarung von Kopenhagen (UNFCCC Copenhagen Accord) und in den EU-Beschlüssen wird eine Begrenzung des globalen Temperaturanstiegs auf 2 °C im Vergleich zur vorindustriellen Zeit als notwendig erachtet, um gefährliche Auswirkungen des Klimawandels einzuschränken, wenngleich NaturwissenschaftlerInnen 1,5 °C vorgeschlagen hatten. Es ist also ein international politisches Ziel, das auf breite Unterstützung stößt, die sowohl Industrienationen, als auch Schwellen- und Entwicklungsländer und nichtstaatliche AkteurInnen umfasst. Ohne Maßnahmen zur Eindämmung der Emissionen ist mit bedeutenden negativen Konsequenzen für die Biosphäre sowie für die sozio-ökonomischen Bedingungen in Österreich zu rechnen. Daraus leiten sich wichtige Verpflichtungen und Maßnahmen ab, an denen sich Österreich zu orientieren hat.

Klimaschutz und -anpassung sind unbedingt erforderliche, für sich allein genommen aber unzureichende, Bedingungen nachhaltiger Entwicklung. Klimaschutz erfordert die gleichzeitige Fokussierung auf klimafreundliche Technologien, Verhaltensweisen und den institutionellen Wandel. Insbesondere betrifft dies die Bereiche Energiebereitstellung und -nachfrage, industrielle Prozesse und Landwirtschaft. Diesen drei Aktivitätsfeldern kommt besondere Bedeutung zu: So verursachte etwa der Energiesektor in Österreich im Jahre 2012 74,6 % der treibhauswirksamen Emissionen, (davon der Straßenverkehr allein mehr als ein Drittel), industrielle Prozesse verursachten 13,6 % und die Landwirtschaft 9,4 % der Emissionen (ohne Effekte der Aufforstung, vgl. Anderl et al., 2014). Die Werte für 2010 betrugen bei Energie: 75,9 %, bei industriellen Prozessen 12,7 % und bei der Landwirtschaft 8,8 % (Anderl et al., 2014). Wenn eine Klimastabilisierung bei 2 °C globaler Erwärmung erreicht werden soll, müssen Kriterien der Klimawirkung in allen zukünftigen Investitions-, Produktions-, Politik- und Konsumentscheidungen als Selbstverständlichkeit integriert werden, um die Gefahr irreversibler Schäden zu begrenzen. Gleichzeitig ist darauf zu achten, dass weder soziale, noch ökonomische Rahmenbedingungen überfordert werden. Klimafreundlichkeit ist also in die wesentlich breiter angelegten Kriterien der Nachhaltigkeit einzubinden.

Die Diskussion klimafreundlicher Maßnahmen ist oftmals auf die zu erwartenden Zusatzkosten und unerwünschten Veränderungen verkürzt. Dabei wird das Potenzial solcher Maßnahmen – nämlich vielfache und unterschiedliche Begleitnutzen zu entfalten – unterschätzt, etwa in den Bereichen Lebensqualität, Gesundheit, Beschäftigung, ländliche Entwicklung, Umweltschutz, Versorgungssicherheit und nicht zuletzt Ausgleich der Handelsbilanzen. Die Internalisierung dieser positiven Begleiteffekte von Klimaschutz kann die ökonomische Beurteilung von Klimaschutzmaßnahmen erheblich verändern.

SUMMARY

There is little doubt that the currently observed patterns of climate change are predominantly caused by human activity (Volume 1, Chapter 1). This chapter addresses the challenge of stabilizing climate change at 2 °C and particularly focuses on the questions which mitigation and adaptation measures in Austria can contribute to achieve this goal. Additionally, a number of desirable co-benefits pertaining to socio-ecological transformation leading towards limiting climate change are analysed.

In the Copenhagen Accord (UNFCC) and in the EU-Ruling, a goal of limiting the rise of global average temperature to +2 °C compared to pre-industrial times has been deemed as necessary to limit dangerous anthropogenic climate change impacts, despite calls from scientists to consider a +1.5 °C target. It is an internationally accepted target supported by a broad number of supporters, including industrialized and developing countries as well as non-state actors. Without actions towards reducing emissions, significant negative impacts on the socio-economic conditions in Austria can be expected. This derives an important obligation to undertake necessary mitigation measures in Austria.

Mitigation and adaptation measures are necessary, but by themselves provide insufficient conditions for sustainable development. Achievement of the 2 °C target requires a focus on climate friendly technologies, as well as behavioural - and institutional change. In particular, the activities of energy provision and consumption, industrial processes and agriculture deserve attention: in 2012, the energy sector activities caused 74.6 % of GHG emissions (with one third originating from road transport), industrial processes caused 13.6 %, and agriculture triggered 9.4 % of emissions, (excluding emission effects of forest cover expansion, cf. Anderl et al., 2014). The

corresponding figures for 2010 are: energy sector 75.9 %, industrial processes: 12.7 %, agriculture: 8.8 % (Anderl et al., 2014). To stabilize the climate, the climate impact criteria have to be integrated in all decisions regarding investment, production, politics and consumption, in order to reduce the risk of irreversible changes. At the same time, the social- and economic framing conditions must be respected. Measures to address climate change have to be integrated into the broader criteria of sustainability.

Discussions of climate protection measures are typically reduced to additional costs and undesirable changes. Thereby the manifold potential co-benefits of such measures, for example with respect to quality of life, health, employment, rural development, environmental protection, security of supply, and international trade balances are mostly ignored. Integrating these criteria and effects into the analysis is required for being able to display the full spectrum of options for addressing climate change.

KERNAUSSAGEN

In Österreich sind bereits gegenwärtig Änderungen in den Wertvorstellungen vieler Menschen festzustellen, die einer sozio-ökologischen Transformation zuträglich sind (mittlere Übereinstimmung, starke Beweislage). Einzelne Pioniere des Wandels sind bereits dabei, diese Vorstellungen praktisch in klimafreundlichen Handlungs- und Geschäftsmodellen umzusetzen (z. B. Energiedienstleistungsgesellschaften im Immobilienbereich, klimafreundliche Mobilität, Nahversorgung, „Sharing Economy“) (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage). Um diese Initiativen zu intensivieren, sind begleitende Politikmaßnahmen erforderlich, die eine verlässliche Regulierungslandschaft schaffen (mittlere Übereinstimmung, starke Beweislage).

- Wichtige technologische Lernprozesse für eine Transformation zu einer klimaverträglichen Gesellschaft sind beobachtbar: Global betrugen z. B. die Investitionen in erneuerbare Energien 2013 214,4 Mrd. US$ und die installierte Kapazität betrug 1,56 TW (bzw. 0,56 TW ohne große Wasserkraftwerke, vgl. REN21 2014). In Österreich ist eine Verstetigung des Regulierungsumfelds erforderlich, um Investitionsrisiken zu reduzieren, technische Lernkurven und Preisreduktionen nachzuvollziehen und einen klimafreundlicheren Energiemix zu erreichen. Damit auch kleinen, kreativen und innovativen AkteurInnen (wie Kommunen, mittelständischen Unternehmen, Bürgerinitiativen, Privatpersonen) eine aktive Teilnahme am Energiemarkt ermöglicht wird (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage).
- Auch für die aus dem Ausland importierten Güter, die in Österreich konsumiert werden, lässt sich eine Klimaverantwortung beschreiben, die oft vernachlässigt wird. So folgen die meisten derzeit verwendeten Energie-/Emissionsmodelle nur den territorialen Systemgrenzen und bilanzieren für produzierende Aktivitäten in den verschiedenen Wirtschaftssektoren, sowie den Handel mit Energieträgern und Emissionszertifikaten (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage). Dabei vernachlässigen sie sogenannte indirekte, „graue“ Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen), die in den Vorleistungsketten von importierten Gütern und Dienstleistungen im Ausland entstanden. Konsumseitig bilanzierende Modelle erfassen diese besser (mittlere Übereinstimmung, mittlere Beweislage). Die technologischen Parameter in diesen Modellen haben nur beschränkte Optionen bezüglich des Klimaschutzes, dementsprechend könnte die Analyse von Vermeidungskosten ausgebaut werden. Faire und effektive Klimaziele sollten sich an beiden, einander ergänzenden Kriterien der Klimaverantwortung orientieren (produktionsseitig und konsumseitig). Effektiver Klimaschutz erfordert eine Orientierung, welche die Auslagerung von Emission in Märkte die keine klimapolitische Regulierung aufweisen vermeidet („carbon leakage“).
- Es gibt drei zentrale Transformationsthemen. Fehlentwicklungen in diesen Bereichen schaffen langfristige emissionsintensive Pfadabhängigkeiten (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage), deren Dynamiken und Klimaeinflüsse in Modellanalysen noch schwer abschätzbar sind.
  - Die Transformation des Energiesystems an sich (gleichzeitiges Verfolgen ambitionierter Energiesparpotenziale und rascher Ausbau erneuerbarer Energiequellen), vor allem deren politische Ökonomie und Governance.
  - Integrierte Entwicklungen im Bereich nachhaltiger Konsum- und Produktionssysteme.
  - Synergiepotenziale von Städten und verdichteten Siedlungsräumen.
- In Österreich wurde eine Reihe von Initiativen zur Verbesserung der Energieeffizienz und zur Förderung erneuerbarer Energieträger vorgeschlagen und teilweise umgesetzt. So wurde etwa in der 2011 veröffentlichten Energiestrategie vorgeschlagen, den Endenergieverbrauch bis 2020 auf das Niveau von 2005 (1 100 PJ) zu reduzieren (siehe auch Band 3, Kapitel 1). Im Ökostromgesetz werden Ziele der Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen von zusätz-

lich 10,5 TWh / Jahr bis 2020 angegeben (ÖSG, 2012), zahlreiche bundes- und länderspezifische Maßnahmen bestehen zur Regulierung von Kleinverbrauch, Raumwärme und Warmwasser. Im Verkehrssektor gelten die Biokraftstoffverordnung und die Gestaltung der Normverbrauchsabgabe als Maßnahmen zum Klimaschutz. Der Industrie- und Energiesektor sind weitgehend im Rahmen des europäischen Emissionshandelssystems reguliert. All diese Zielvorgaben reichen allerdings nicht über das Jahr 2020 hinaus und die anvisierten Ziele der Energiestrategie sind nicht mit bindenden regulatorischen Maßnahmen unterfüttert (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage). Auch die Ausbauziele für erneuerbare Energieträger werden nicht am 2 °C Ziel gemessen und werden zudem wahrscheinlich deutlich vor 2020 erreicht (mittlere Übereinstimmung, mittlere Beweislage), während es unwahrscheinlich ist, dass im Industriesektor eine tatsächliche Trendwende der Emissionen erreicht wird (siehe auch Band 3, Kapitel 5) (mittlere Übereinstimmung, mittlere Beweislage). Die erwarteten Einsparungen von THG-Emissionen beim Ersatz fossiler Treibstoffe durch Biokraftstoffe werden durch Lebenszyklusstudien in Frage gestellt (siehe auch Band 3, Kapitel 2 und 3). Insgesamt ist es daher unwahrscheinlich, dass diese Maßnahmen ausreichen, um einen ausreichenden Beitrag zur Einhaltung des 2 °C Ziels zu leisten (hohe Übereinstimmung, starke Beweislage). Für eine sozio-ökologische Transformation, welche Wirtschaft und Gesellschaft auf einen nachhaltigen Entwicklungspfad umlenken würde, wären grundlegendere Veränderungen der vorherrschenden Produktions- und Konsumsysteme sowie der Regulierungspraktiken nötig.

6.1 Einleitung
6.1 Introduction

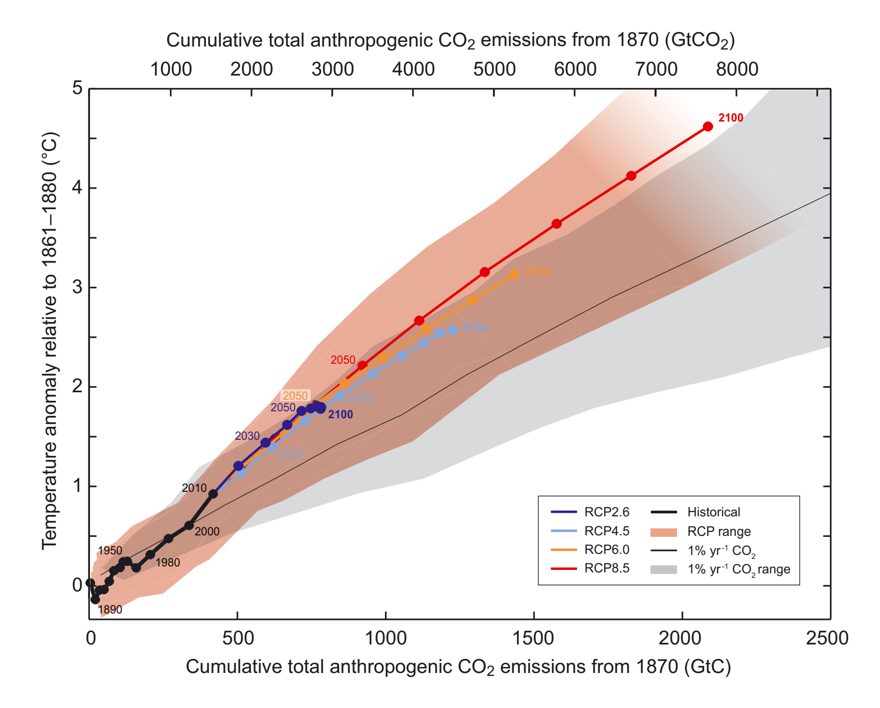
Der Weltklimarat der Vereinten Nationen legte kürzlich den fünften Sachstandsbericht vor. Wenn der Klimawandel bei 2 °C stabilisiert werden soll, müssen die Emissionen so rasch wie möglich ihr Maximum erreichen und dann bis 2050 um ein bis zwei Drittel sinken (IPCC, 2014a). Eine weitere Verzögerung weltweiter Schutzmaßnahmen gefährde zunehmend das Ziel, die Zunahme der Erderwärmung auf maximal 2 °C zu begrenzen. Außerdem reduziere eine Verzögerung die Handlungsmöglichkeiten und steigere die Kosten für den Klimaschutz erheblich (IPCC, 2014b). Das erfordert mehr als inkrementell verbesserte Produktionstechnologien, grünere Konsumgüter und eine Politik, die marginale Effizienzsteigerungen anstößt. Es braucht eine Transformation der Interaktion zwischen Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt. Die Änderungen müssen außerdem rasch umgesetzt werden, ansonsten steigt die Gefahr von irreversiblen Schäden.

Wie die vorhergehenden Kapitel im Detail zeigten, sind weltweit (z. B. Korallenriffe, Permafrostböden der Arktis) und auch in Österreich (z. B. Gletscher) bereits großflächige Veränderungen fragiler Ökosysteme zu beobachten (siehe auch Band 1, Kapitel 3 und Band 2, Kapitel 2). Sollte es nicht gelingen, die Energie- und Landnutzungssysteme rasch so zu transformieren, dass sie wesentlich weniger THG-Emissionen verursachen, droht eine Erhöhung der globalen Durchschnittstemperatur um 3–5 °C. Damit wäre ein Zusammenbruch zahlreicher natürlicher und gesellschaftlicher Systeme verbunden, die dem Anpassungsdruck an den Klimawandel nicht standhalten könnten und deren funktioneller Ausfall komplexe, nicht absehbare Folgen hätte.

Der bis zum Ende des 21. Jahrhunderts und darüber hinaus realisierte Temperaturanstieg hängt maßgeblich von den bis dahin kumulierten CO_2-Emissionen ab. Entscheidende Wirkungen des Klimawandels bleiben für viele Jahrhunderte nach dem Aussetzen der CO_2-Emissionen bestehen. Abbildung 6.1 illustriert diesen Zusammenhang anhand von Ergebnissen zahlreicher Modelle, für jeden der vier „Repräsentativen Konzentrationspfade“ (RCP; Moss et al., 2010; van Vuuren et al., 2011) bis 2100; jeder RCP ist als farbige Linie und mit Punkten für die Durchschnitte pro Jahrzehnt dargestellt. Empirisch belegte Ergebnisse über die historische Periode (1860 bis 2010) werden fettgedruckt in schwarz angezeigt. Die dünne schwarze Linie zeigt Modellergebnisse mit einer jährlichen CO_2 Steigerung von 1 %. Der rosafarbene Bereich zeigt die Spannweite der Ergebnisse des gesamten Szenario-Ensembles für die vier RCPs[1]. Diese sind jeweils nach ihrem im Jahr 2100 erreichten Strahlungsantrieb (zwischen 2,6 und 8,5 W / m²) benannt (siehe auch Band 1, Kapitel 1 und Band 3, Kapitel 1).

In Bezug auf realistische und kostenoptimale Transformationspfade zu einer klimaverträglichen Gesellschaft ist es wichtig ein möglichst frühzeitiges Gipfeln der globalen THG-Emissionen zu erreichen: Jede Verzögerung des Scheitelpunkts in die Zukunft reduziert die Wahrscheinlichkeit innerhalb

[1] Die RCP-Szenarien definieren einen Konzentrationsverlauf bis 2100, mit Erweiterungen bis 2300. Um diesen Verlauf einzuhalten, gibt es verschiedene Pfade durch unterschiedliche Klimaschutzmaßnahmen (z. B. Steigerung der Energieeffizienz, Reduktion der fossilen Energieerzeugung, Verlangsamung der Entwaldung). Diese können zu unterschiedlichen Anteilen zur Einhaltung der RCP-Pfade beitragen. Die RCP-Szenarien stellen „wenn-dann“ Optionen der künftigen Entwicklung dar.



IPCC (2013) Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Figure SPM.10. [Stocker,T.F., D.Qin, G.-K. Plattner, M.Tignor, S.K.Allen, J.Boschung, A.Nauels, Y.Xia, V.Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA.

Abbildung 6.1 Die Wirkung kumulativer anthropogener CO_2-Emissionen und der Temperaturanstieg, historisch von 1870 bis 2010, sowie zukünftig in den vier neuen „Repräsentativen Konzentrationspfaden" (RCP), welche für den IPCC AR5 (Fünften Sachstand Bericht) entwickelt wurden. Die durchschnittliche globale Oberflächentemperatur steigt als Funktion vom kumulativen gesamten CO_2-Emissionen. Multimodellergebnisse von einer Hierarchie von Kohlenstoffkreislaufmodellen für jeden RCP bis 2100 werden in farbigen Linien und dekadischen Durchschnitten (Punkte) gezeigt. Um die Klarheit zu erhöhen sind manche dekadischen Mittelwerte extra ausgewiesen (z. B. 2050 steht für die Dekade 2040 bis 2049). Modellergebnisse für die historische Periode (1860 bis 2010) sind in schwarz dargestellt. Die farbige Fahnendarstellung zeigt die Streuung der Multimodellergebnisse über die vier RCP-Szenarien und wird mit abnehmender Anzahl von verfügbaren Modellen in RCP8.5 immer geringer. RCP8.5 umreißt eine Entwicklung mit weiter steigenden Emissionen, bei der mit einer Erwärmung um rund vier Grad Celsius bis 2100 zu rechnen ist. Für die drei weiteren Konzentrationspfade werden unterschiedlich strenge Klimaschutzmaßnahmen angenommen, die umfassendsten im RCP2.6 (nur bei diesem Konzentrationspfad ist die Wahrscheinlichkeit höher als 50 %, dass sich die Erde um weniger als zwei Grad Celsius gegenüber vorindustriellen Werten erwärmt). Quelle: IPCC AR5 WG1 SPM (2013)

Figure 6.1 The impact of cumulative total anthropogenic CO2 emissions increase for the historic 1870-2010 period and future for the four new „Representative Concentration Pathways" (RCP) developed for the IPCC AR5 (Fifth Assessment Report). Global mean surface temperature increases as a function of cumulative total global CO2 emissions. Multimodel results from a hierarchy of climate-carbon cycle models for each RCP until 2100 are shown with coloured lines and decadal means (dots). For clarity, some decadal means are depicted separately (e.g., 2050 indicating the decade 2040 2049). Model results for the historical period (1860 to 2010) are indicated in black. The coloured plume illustrates the multi-model spread over the four RCPs and fades with the decreasing number of available model runs for the RCP8.5. RCP8.5 portrays future development with continuous emissions increase leading to a global mean temperature warming of about four degrees Celsius by 2100. The other three concentrations pathways assume different climate change mitigation measures, the most stringent are assumed in RCP2.6 (only in the case of this concentrations pathway is the probability higher than 50 % that the temperature increase would be lower than two degrees Celsius compared with the preindustrial levels). Source: IPCC AR5 WG1 SPM (2013).

des 2 °C-Emissionskorridors zu bleiben und vervielfacht die Rate der später jährlich erforderlichen Emissionsreduktionen (GEA, 2012; vgl. auch Band 3, Kapitel 1). Reduktionskosten müssen zwar in Bezug zu zukünftigen Einkommen gesetzt werden, doch steigen mit einer Verzögerung die Risiken unerwünschter biophysischer Wirkungen. In den meisten 2 °C-kompatiblen Klimastabilisierungsszenarien wird daher der Scheitelpunkt noch vor 2020 erreicht (siehe auch Band 3, Kapitel 1). Daraus leitet sich die Dringlichkeit des Handelns ab.

Dieses Kapitel präsentiert einen ersten und zwangsläufig noch lückenhaften Überblick über Transformationsforschung mit Bezug zum Klimawandel auf der österreichischen Skalenebene. Es behandelt zuerst die Kontextualisierung von Klimawandel im Rahmen weiterer sozio-ökonomischer Krisen (Abschnitt 6.2.1) und argumentiert die Notwendigkeit der sozio-ökologischen Transformation (Abschnitt 6.2.2). Abschnitt 6.2.3 beschäftigt sich mit dem in der Politik wichtigen Konzept „Green Growth", gefolgt von einer Diskussion über die Messung sozio-ökonomischer Leistung und des Wohlergehens (Abschnitt 6.2.4). Abschnitt 6.3 beschäftigt sich hauptsächlich mit den Problemlagen und AkteurInnen, während sich Abschnitt 6.4 mit Handlungsempfehlungen zur Übersetzung globaler Transformationspfade in nationale und lokale Strategien zur Klimawandelvermeidung und -Anpassung beschäftigt. Das Kapitel schließt mit Schlussfolgerungen und einer kurzen Diskussion des Forschungsbedarfs.

6.2 Kontextualisierung der Klimadebatte
6.2 Contextualisation of the climate debate

6.2.1 Der Zusammenfall mehrerer Krisen

Trotz des inzwischen deutlich besseren Verständnisses des Klimawandels, der damit verbundenen Umweltprobleme und gesellschaftlichen Risiken, erwiesen sich darauf bezogene Politikmaßnahmen bisher als unzureichend um die gefährlichen Trends umzukehren. Die überwiegende Wirkungsrichtung der bisher vorgeschlagenen Maßnahmen war „top-down" strukturiert und auf Nationalstaaten bezogen, sowie teilweise in internationalen Verträgen verbrieft. Eine wesentliche Ursache für die Ineffektivität gegenwärtiger Klimapolitik liegt darin begründet, dass sie es vermeidet anzuerkennen, welch große Zahl an AkteurInnen an der Klimaverantwortung teilhaben und dass ein interaktiv organisierter (bottom-up und top-down) sowie rückgekoppelter Politikprozess zu deren effektiver Regulierung notwendig wäre (Sabatier, 1986; Falkner et al., 2010; Leach et al., 2012; Brand und Görg, 2013; Falkner, 2013). Die wiederholte Enttäuschung von Erwartungen bezüglich internationaler Klimaverhandlungen ist eine weitere Ursache für die Klimapolitikverdrossenheit (Goldin, 2013). Ein dritter bedeutender Faktor für das Politikversagen ist in der tatsächlich komplexen Verbindung von Sozial- und Umweltproblematik begründet (Littig und Griessler, 2005).

Um gangbare Pfade in Richtung Nachhaltigkeit entwerfen zu können, ist es erforderlich ein Verständnis für die Zusammenhänge zwischen Umweltzerstörung, Armut und sozialer Ungleichheit zu entwickeln (Scoones et al., 2007; Brand und Wissen, 2011). Ein umfassender Lösungsansatz muss Wechselwirkungen komplexer dynamischer Systeme auf verschiedenen Skalenebenen berücksichtigen. Beispiele für solche Interaktionen sind das Zusammenwirken von Klimawandel, Mobilitätsverhalten und Landnutzungsänderungen, weiters Bevölkerungsentwicklung, Gesundheitszustand der Bevölkerung und Umweltschädigung, letztlich der technologische Wandel und globale Marktintegration sowie die Tatsache, dass einige Teile der Welt sich rasch verändern, während andere in Stagnation und Armut verharren. Außerdem wird zunehmend erkannt, dass Nachhaltigkeitsprobleme in den Lebensstilen und der damit verbundenen derzeitigen Organisationsform von Produktion und Konsum, begründet sind. In struktureller Hinsicht stehen die Krise des Klimawandels und der übermäßige Ressourcenverbrauch in engem Zusammenhang mit der derzeit vorherrschenden wirtschaftlichen Ordnung. Die Hauptorientierung liegt dabei auf internationaler Wettbewerbsfähigkeit. Aus dieser Perspektive sind die ressourcenintensiven Lebensweisen und Produktionsverhältnisse, sowie das Herrschen von wenigen über viele und die zunehmende wirtschaftliche Ungleichheit allesamt Bestandteil und Grundursache der Klimakrise (Brand, 2009).

Weil die gegenwärtig vorherrschenden Strukturen und Praktiken für die Nachhaltigkeitskrise ursächlich sind, müssen diese zur Überwindung der Krise verändert werden. Jene derart umfassenden sozioökonomischen Veränderungsprozesse, die auf Nachhaltigkeit abzielen, werden als sozio-ökologische Transformation bezeichnet (Scheffer et al., 2002; Voß et al., 2006).[2]

6.2.2 Sozio-ökologische Transformation

Transformationen sind Prozesse, die physische oder qualitative Änderungen in Systemen hervorrufen und deren Form, Struktur oder Bedeutung verändern. Es handelt sich dabei um „Änderungen der Grundeigenschaften von Systemen (inklusive des Wertesystems, der regulativen, legislativen oder bürokratischen Regime, der finanziellen Institutionen sowie technologischer oder biologischer Systeme)" (IPCC, 2012).

Sozio-ökologische Transformationen sind ausgesprochen pfadabhängig. Historische Entwicklungen beeinflussen, ermöglichen oder begrenzen maßgeblich die zukünftig mögliche Ausprägung gesellschaftlicher Strukturen. Darüber hinaus sind sozio-ökologische Systeme durch interne Komplexität und Ungewissheit charakterisiert. Bezüglich sozio-ökologischer Transformationen sind wir mit erheblichen Grenzen der Lenkbarkeit, etwa durch Politikentscheidungen oder administrative Steuerungseingriffe konfrontiert (Voß und Kemp, 2005). Brand und Wissen (2011) argumentieren, dass die aktuellen Strukturen und Regulationsmechanismen im Wesentlichen neoliberal geprägt sind und zu klimatisch unerwünschten Resultaten führen. An deren Stelle sollten Strukturen, Regulationsmechanismen und Praktiken treten, die gleichsam der Gesellschaft und den biophysischen Systemen nützen.

Folke et al. (2010) unterscheiden zwischen eigendynamischen und forcierten Transformationen, je nachdem in welchem Ausmaß das System von sich aus veränderbar ist. Die Transformierbarkeit beschreibt die spezifische Fähigkeit wandelbar zu sein, auf Impulse zu reagieren und sich umzuformen oder in einen fundamental anderen Zustand zu wechseln,

[2] Siehe auch: „Review, Scoping & Innovation: The State of the Art of Transformation Research, Key Researchers, and Research Gaps and Opportunities" (Austrian contribution to the JPI CLIMATE – FTA on „Scoping and Reviewing SSH contributions to Climate Change Research"), coordinator: U Brand, October 2012 – June 2013.

sollten ökologische, ökonomische oder soziale Umstände dies erfordern. Forcierte Transformationen sind extern induziert (z. B. durch Versorgungsengpässe oder andere Krisensituationen); sie werden nicht aktiv und freiwillig durch ihre AkteurInnen angestrebt. Die Möglichkeiten, die Richtung von sozio-ökologischen Transformationen zu beeinflussen, sind vielfältig. Solche Impulse können von vielen AkteurInnen ausgehen und erfolgen im Rahmen gesellschaftlicher Diskurse und Verhandlungen. Der Koordination zwischen „PionierInnen" und heterogenen AgentInnen des Wandels kommt daher eine Schlüsselrolle zu (Voß und Kemp, 2005). Der Wissenschaftliche Beirat der deutschen Bundesregierung zu globalen Umweltveränderungen WBGU (2011) schlägt dementsprechend die Ausarbeitung eines neuen Gesellschaftsvertrags als Basis für die bevorstehende große Transformation vor.

Da die gegenwärtigen ökologischen, ökonomischen oder sozialen Umstände das bestehende System unhaltbar machen, werden für sozio-ökologische Transformationen neue Pfade eröffnet und Praktiken entwickelt (Gunderson und Holling, 2002; Walker et al., 2004; Folke et al., 2010). Darunter fallen etwa transformative Ansätze der Klimawandelvermeidung und -anpassung, die über marginale und inkrementelle Schritte hinausgehen. Solche Maßnahmen können Änderungen in Form und Struktur erfordern und grundsätzlich neue Handlungsstrategien propagieren.

Empirische Analysen gehen zunehmend von einem Transformationsbedarf aus (Krausmann et al. 2008; Steinberger et al., 2010). Insbesondere wichtig sind in diesem Zusammenhang Untersuchungen, die sich mit dem gesellschaftlichen Metabolismus (Ayres, 1977) von landbasierten Ressourcen (Krausmann, 2006; Erb et al., 2008), dem Energiesystem (van Vuuren et al., 2012), sowie der Integrität von Ökosystemen und dem Erhalt von Biodiversität befassen (Chapin et al., 2009; Chapin et al., 2010).

In einigen Politikbereichen wird die Diskussion über sozio-ökologische Transformation auf Konzepte wie „nachhaltiges Wachstum", „qualitatives Wachstum" oder die aktuelle Variante „Green Growth" reduziert. Dabei handelt es sich um das Ansinnen die Produktionsweise vor allem durch neuere Technologie umweltfreundlicher zu machen, die Produktions- und Konsumlogik jedoch unverändert zu lassen. Die „Green Growth" Agenda wird von Brand (2012) kritisiert, weil sie politische, ökonomische, biophysische und kulturelle Rahmenbedingungen ignoriert. Der kürzlich veröffentlichte European Report on Development (2013) erkennt zwar „Green Growth" als Politikoption an, fordert aber gleichzeitig eine wesentlich breitere Palette von Zielvorstellungen und strukturellen Änderungen, die eine inklusive und nachhaltige Entwicklung gleichsam auf der lokalen, nationalen, und globalen Ebene ermöglichen.

Da „Green Growth" als dominante umweltpolitische Ausrichtung eine große Gefolgschaft hat und die grundlegende Frage, ob Wirtschaftswachstum Ursache oder auch Lösung von Umweltproblemen sein kann, in diesem Zusammenhang besonders relevant ist, soll das Konzept im folgenden Kapitel detaillierter präsentiert werden.

Green Growth

Grüne Politik kann so gestaltet werden, dass auch das soziale Wohl gefördert wird. Dazu sind neben der absoluten Reduktion biophysischer Schädigung, soziale Ziele wie soziale Inklusivität und Gerechtigkeit zu berücksichtigen.

„Green Growth" wurde als Maßnahmenbündel rund um Rio +20 für einen großflächigen Einsatz propagiert. Da „Green Growth" in der Politikarena derzeit viel Aufmerksamkeit bekommt, seien im Folgenden die Argumente von BefürworterInnen und KritikerInnen gegenübergestellt.

Die BefürworterInnen argumentieren, dass Wirtschaftswachstum weiterhin als Kern der Wirtschaftspolitik aufrechtzuerhalten sei. Außerdem könnten Kosten sogar gesenkt werden, wenn Regulierungen dementsprechend formuliert werden und marktbasierende Politikinstrumente darauf ausgerichtet werden die Umwelt zu schützen (UN DESA und UNDP, 2012). „Green Growth" wird als Transformationspfad zu nachhaltiger Entwicklung gesehen. Es geht weiterhin um Wachstumsförderung, ergänzt um Inklusivität (z. B. UNU-IHDP und UNEP, 2012) und Reduktion von Umweltauswirkungen. Allerdings bedingt dies eine Auseinandersetzung mit politischen Einschränkungen, einer Überwindung verfestigter Verhaltensmuster wie sozialer Normen und die Entwicklung innovativer Finanzierungsinstrumente, um Anreize zu setzen und Innovationen zu fördern. Dies ist vor allem vor dem Hintergrund von Markt-, Politik- und institutionellem Versagen, die zum übermäßigen Gebrauch unserer natürlichen Ressourcen führen, wichtig (World Bank, 2012).

Koreas nationale Strategie für „Green Growth" (2009 bis 2050) und der 5-Jahres Plan (2009 bis 2013) werden generell als beste Beispiele für Maßnahmen im Sinne von „Green Growth" angesehen. Sie bieten einen umfassenden politischen Rahmen für „Green Growth" mit kurz- und langfristigen Zielsetzungen. Während es oft Schwierigkeiten gibt, den Erfolg von grünem Wachstum sowohl ex ante zu schätzen als auch ex post zu bewerten, ist Korea eines der Länder, die bereits die OECD „Green Growth" Indikatoren anwenden (OECD, 2013). Die Strategie soll folgende Zielsetzungen langfristig verfolgen:

1. Förderung neuer umweltfreundlicher Wachstumsmotoren
2. Verbesserung der Lebensqualität der Menschen
3. Beitrag zu den internationalen Anstrengungen zur Bekämpfung des Klimawandels

Um ihre Realisierung zu erleichtern, wurde eine Präsidentenkommission zu „Green Growth" im Jahr 2009 gegründet und ein „Low Carbon Green Growth"-Gesetz 2010 beschlossen. Der 5-Jahres Plan skizziert Maßnahmen sowie spezifische Budgets der Regierung für die Umsetzung der Strategie sowie detaillierte Aufgaben für Ministerien und lokale Regierungseinheiten. Nach dem Plan wird die Regierung für Programme und Projekte grünen Wachstums etwa 2 % des jährlichen BIPs ausgeben (OECD, 2011a). „Green Growth" ist somit ein wichtiger Teil der neuen Koreanischen Entwicklung.

Während „Green Growth" nicht eindeutig definiert ist, kann es als Versuch gesehen werden wachstumsorientierte Politik mit Umweltzielen zu konsolidieren. Generell wird Wirtschaftswachstum weiterhin als bedeutendes Ziel für Länder gesehen, in denen große Teile der Bevölkerung arm sind. Für reiche Länder wird es zunehmend differenzierter diskutiert. Vor diesem Hintergrund wird die globale Annahme Wirtschaftswachstum sei zu fördern, kritisiert.

KritikerInnen bemängeln, dass die dem Begriff innewohnende Widersprüchlichkeit tendenziell zu inkonsistenten und paradoxen Ergebnissen führt. Als politische Strategie wird „Green Growth" oft als zu wenig ambitioniert beurteilt, insbesondere wenn Maßnahmen, die aus Umweltperspektive problematisch sind als positiv eingestuft werden. Laut KritikerInnen vernachlässigt „Green Growth" wichtige Nachhaltigkeitsaspekte der Gesellschaft. Sie sehen „Green Growth" bloß als neuen Begriff für das übliche Wirtschaftswachstum. Dadurch können erforderliche gesellschaftliche Diskurse und Konflikte vermieden oder hinausgezögert werden und eine strukturelle Neuorientierung der Wirtschaft unter Klimaschutzprämissen wird vertagt. Hier zeigen sich Parallelen zum Begriff „Sustainable Development", der zwar erfolgreich ist, indem er unterschiedlichste Parteien an einen Tisch vereinigt, der aber inhaltlich so weit gespannt ist, dass eine konstruktive Verständigung der versammelten GesprächspartnerInnen ausbleibt. Außerdem wird kritisiert, dass in allen anderen Ländern außer dem Paradebeispiel Korea „Green Growth" durch nur wenige konkrete Umweltinvestitionen oder –maßnahmen umgesetzt wurde und der Fokus auf der diskursiven Ebene blieb.

Auch die Umsetzung des Ziels der sozialen Inklusivität wird kritisiert. So wird argumentiert, dass „Green Growth" vor allem auf das Industrie- und Finanzkapital und die Zentralregierung ausgerichtet sei und somit in Widerspruch zum Ziel der nachhaltigen Entwicklung stehe, die auf die Beteiligung und Einbeziehung der lokalen Regierungen, lokaler Unternehmen sowie BürgerInnen abziele (Moon et al., 2010).

Der Begriff „Green Growth" ist relativ jung, unter anderem weil in früheren Phasen der Industrialisierung, bis in die 60er Jahre, die Umweltwirkungen von Industrieprozessen als räumlich begrenzt und von marginaler Bedeutung wahrgenommen wurden. Mit dem Auftreten von großräumigen Umweltproblemen (wie etwa überregionaler Luftverschmutzung oder des Ozonlochs) entwickelte sich ein Umweltbewusstsein, das zunächst jedoch auf die Umsetzung von „end of pipe" Technologien (z. B. höhere Schornsteine, längere Abwasserrohre, Filtertechnologien) fokussierte.

Der augenscheinliche Erfolg einige der dringenden Umweltprobleme in den Griff zu bekommen (z. B. globale Substitution halogenierter Kohlenwasserstoffe durch ozonfreundlichere Substanzen, regionale Bekämpfung von kohlebasiertem Smog oder fäkaler Kontaminierung von Wasser) resultierte wiederum in der Zuversicht Umweltprobleme effektiv adressieren und regulieren zu können. Entsprechend wurde Wirtschaftswachstum eher als Lösungsstrategie, denn als Ursache von Umweltproblemen wahrgenommen. Die Umwelt-Kuznets-Hypothese (vgl. Kuznets, 1955; Grossman und Krueger, 1995; Stern et al., 1996; Torras und Boyce, 1998; Stagl, 1999; Stern und Common, 2001; Stern, 2004) verdeutlicht diese Sichtweise: im Prozess zunehmender Wirtschaftsaktivität leiden Länder in manchen Bereichen zwar zunächst unter zunehmender Umweltschädigung, sind aber bei höherem Einkommensniveau fähig, die negative Umweltwirkung zu reduzieren. Diese, in der Entwicklungspolitik auch unter dem Slogan „grow now, clean up later" diskutierte, Perspektive ist seit den 1980er Jahren vielfach Ausgangspunkt politischer Argumentation und stellt so ein strukturelles Grundelement des „Green Growth" Paradigmas dar (vgl. Weizsäcker et al., 2009).

Während die Umwelt-Kuznets-Hypothese empirisch tatsächlich für einige räumlich begrenzt wirksame Umweltprobleme, für die kostengünstige technische Lösungen zur Verfügung stehen, bestätigt wurde, ist dies für globale Umweltprobleme wie z. B. den Klimawandel wie auch Abfall und diverse Emissionen des Verkehrs sehr viel weniger der Fall (Mills und Waite, 2009). Auch für Luftverschmutzung in Städten sind beschränkt Belege für die Stimmigkeit der Umwelt-Kuzents-Kurve zu finden (McGranahan et al., 2001).

Rockström et al. (2009) zeigen, dass eine Reihe von „planetary boundaries" existieren, also rahmenbestimmender Umweltprozesse der planetaren Tragfähigkeit, deren Über-

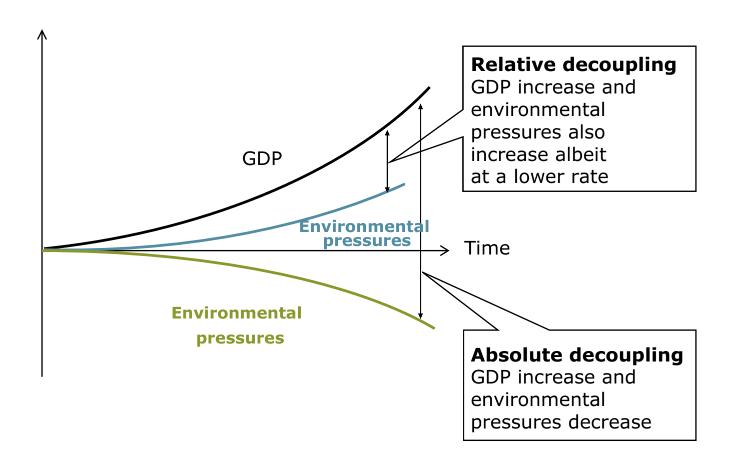


Abbildung 6.2 Das Konzept der relativen und absoluten Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Umweltwirkung. Quelle: EEA (2012a)

Figure 6.2 The concept of relative and total decoupling of economic growth and environmental impact. Source: EEA (2012a)

schreitung jeweils ernsthafte Folgen für die weitere Stabilität der Biosphäre hat. Einige dieser biophysischen Schwellen sind bereits überschritten, wobei der anthropogene Klimawandel ein Schlüsselproblem darstellt. Diese Analyse legt auch nahe, dass das Einhalten von biophysischen Schwellenwerten nicht mit den gegenwärtig vorherrschenden Wirtschaftsstrategien vereinbar ist, die weiterhin im Wesentlichen darauf basieren, den Energieverbrauch und weiteren Ressourcendurchsatz der Gesellschaft zu erhöhen.

Moderne Volkswirtschaften und orthodoxe ökonomische Forschung sind strukturell eng mit dem Paradigma des unbegrenzten wirtschaftlichen Wachstums verbunden (Mishan und Mishan, 1967; Daly, 1977; Jackson, 2009; Seidl und Zahrnt, 2010; Coyle, 2011). Nationale und internationale Klimaschutzpolitik konzentriert sich auf wachstumsabhängige Politikmaßnahmen und eine wachsende Zahl von Studien hinterfragen kritisch die Auswirkungen von stringenten Klimaschutzzielen auf die Entwicklungspfade von Volkswirtschaften, sowie die dabei zu erwartenden Rückkopplungen (vgl. Victor, 2008; Jackson, 2009; Jackson und Victor, 2011; Victor, 2012; Rezai et al., 2013).

Die unkritische Übernahme des Begriffs „Green Growth“ in weitere Politikfelder eröffnet Fragen bezüglich der wissenschaftlichen Grundlagen des Konzepts. Scrieciu et al. (2013) untersuchten die Herkunft des Diskurses zu „Green Growth“. Sie beziehen sich auf die folgenden zwei Definitionen um „Green Growth“ zu kategorisieren: „Die OECD definiert Green Growth als ‚Wachstum‘ das es natürlichen Lebensgrundlagen erlaubt, ‚weiterhin die Ressourcen und Umweltdienstleistungen bereitzustellen, auf denen unser Wohlergehen beruht‘, […]. Die UNEP definiert es als ‚[e]in Wirtschaften das langfristig zu verbesserten Lebensumständen und der Überwindung von Ungleichheit führt, aber dabei zukünftige Generationen nicht wesentlichen Umweltrisiken oder ökologischen Engpässen aussetzt‘“ (Scrieciu et al., 2013). Beide Definitionen schreiben der öffentlichen Politikgestaltung eine zentrale Rolle zu, den Märkten bezüglich der oben beschriebenen Nachhaltigkeitsgrenzen Schranken zu setzen. Scrieciu et al. (2013) argumentieren, dass zwar die zentrale Bedeutung öffentlicher Politikmaßnahmen weitgehend anerkannt ist und schon bisher in zahlreichen Diskussionen weitreichendere gesellschaftliche Transformationen als nötig erachtet wurden, um dem Ziel der Nachhaltigkeit näherzukommen, dass allerdings diese Fortschritte in Modellierungsansätzen erst in den letzten Jahren nachvollzogen wurden (z. B. WBGU, 2011; GEA, 2012). Edenhofer et al. (2006) fanden, dass Unterschiede in den Kostenabschätzungen für klimapolitische Maßnahmen besser durch die Zugehörigkeit eines Modells zu einer Modellierungsgruppe erklärt werden können, als durch die modellspezifischen Annahmen.

Die meisten herkömmlichen Modelle zu den volkswirtschaftlichen Kosten des Klimaschutzes basieren auf intertemporaler Optimierung und allgemeinen Gleichgewichtsmodellen, in denen auf Grund von Preissignalen ein neuer Gleichgewichtszustand erreicht wird. In derartigen Modellen wird Klimapolitik als Kostenstruktur (Summe von direkten Kosten, die Ressourcen von Konsum und konventionellen Investitionspfaden, sowie von indirekten Kosten, die etwa Mitnahmeeffekte ineffizienter Politikmaßnahmen beschreiben) abgebildet. Sofern solche Modelle die Nutzen der Klimapolitik nicht ebenso abbilden, weisen sie in der Regel die „Green Growth Hypothese“ zurück. Ein Teil der Modelle, die in Scrieciu et al. (2013) vorgestellt werden, gehen allerdings über das Paradigma der automatischen Rückkehr zu Gleichgewichten in allen Märkten hinaus und bringen Argumente für aktive Politikmaßnahmen, die gleichzeitig in höherem Gesamtoutput und besseren Umweltzuständen resultieren (Edenhofer et al., 2006; Scrieciu et al., 2013).

Wo steht Österreich in diesem Zusammenhang?

Ein zentrales Element in der „Green Growth" Debatte ist die Annahme, dass erhöhte Energie- und Materialeffizienz dazu beitragen werden, die an sich widersprüchlichen Ziele von Wirtschaftswachstum und Nachhaltigkeit zu vereinen, also über eine relative Entkopplung von Umweltwirkung und Wirtschaftswachstum hin zu einer absoluten Entkopplung zu kommen (siehe Abbildung 6.2).

Empirische Betrachtungen der jüngeren Vergangenheit lassen allerdings an einem Automatismus dieser Entwicklung zweifeln, wobei das Beispiel der österreichischen Wirtschaft in diesem Zusammenhang aussagekräftig ist. Die weiter unten folgende Abbildung 6.3 bildet für Österreich die Entwicklung der Kohlenstoffintensität (welche eng verbunden mit der Energieintensität ist) ab, sowie die allgemeine Wirtschaftsleistung, ausgedrückt als Bruttoinlandsprodukt (BIP) für die Jahre 1990 bis 2011, basierend auf früheren Berechnungen (Mechler et al., 2010). Ein Wachstum des absoluten BIP wird in Abbildung 6.3 durch Bewegungen der Trajektorie nach oben abgebildet, während eine Zunahme der Kohlenstoffintensität des BIP die Trajektorie nach links lenkt. Das Produkt beider Zahlen repräsentiert die gesamte Emissionsmenge in Österreich (bzw. des Vereinigten Königreichs) für das jeweilige Jahr. (GDP [$] * THG-Intensität [kg CO_2-Äq./$] = Emissionen [kg CO_2-Äq.]) Ausgehend von diesen Beziehungen ist es möglich, Kurven gleicher Emissionsmengen (Iso-Emissionskurven) bei unterschiedlicher Wirtschaftsentwicklung zu zeichnen, wobei hier zwei Beispiele dargestellt werden: (i) Die untere Linie an Isoquanten illustriert die Emissionsmengen die unter Berücksichtigung des Kyoto Protokolls zulässig wären (im Fall von Österreich: 68,8 Mt CO_2-Äq.); (ii) die obere Linie illustriert Emissionsmengen des Kyoto Referenzjahrs 1990 (im Fall von Österreich: 78,2 Mt CO_2-Äq.).

Die Kurvenentwicklung für Österreich zeigt, dass zwar Verbesserungen der THG-Intensität in der berücksichtigten Periode beobachtbar sind, diese allerdings überkompensiert werden durch das Wirtschaftswachstum. Entsprechend gelang es Österreich weder in dem in dieser Grafik abgebildeten Zeitraum, noch in weiteren hier nicht dargestellten Jahren, die angestrebten Reduktionen von 13 % zu erreichen oder etwa die THG-Emissionen auch nur konstant zu halten. Tatsächlich nahmen zwischen 1990 und 2011 die Emissionen in Österreich um 6 % zu. Österreich hat die Kyoto-Ziele zwar erreicht, allerdings durch Anwendung der „flexiblen Instrumente", d. h. durch den Ankauf von Emissionszertifikaten aus dem Ausland im Ausmaß von etwa 500 Mio. € (siehe EEA, 2012b). Zahlreiche Länder in Europa folgten einem ähnlichen Ansatz (insgesamt 10 der 15 Länder die durch das Kyoto Protokoll zu Reduktionen verpflichtet waren, vgl. EEA,2012b).

Das Vereinigte Königreich (unterer Graph in Abbildung 6.3) wird oft als Paradebeispiel zitiert, weil sie zumindest scheinbar erfolgreich eine Strategie des „Green Growth" verfolgten. Allerdings ist dieser Erfolg teilweise den speziellen äußeren Umständen zuzuschreiben, wie der Entdeckung von Erdgas in der Nordsee, was einen kostengünstigen Übergang der Stromproduktion von ursprünglich vorwiegend Kohlekraftwerken, hin zu weniger emissionsintensiven Gaskraftwerken ermöglichte, ohne sich dabei von Gasimporten abhängig zu machen. Auch fand in diesem Zeitraum ein wirtschaftlicher Strukturwandel statt, in dem energieintensive Industriesektoren ins Ausland verlagert wurden, während der Banken- und Dienstleistungssektor ausgebaut wurde. Abbildung 6.4 zeigt beispielsweise, dass die Energieintensität des UK in den vergangenen 20 Jahren um jährlich mehr als 2,5 % sank, wobei Struktureffekte und Effizienzverbesserungen etwa im gleichen Ausmaß dazu beitrugen. Das Vereinigte Königreich schaffte es so Emissionseinsparungen und die Erfüllung der Kyoto Kriterien in erster Linie durch Maßnahmen im Inland zu erreichen und dabei gleichzeitig eine Erhöhung der Wirtschaftsleistung zu erzielen.

Das Vereinigte Königreich hat allerdings auch weit vorausschauende und legal bindende Politikmaßnahmen initiiert. So wurde bereits 2008 im Rahmen des beschlossenen Klimaschutzgesetzes (Climate Change Act) das Ziel formuliert, bis 2050 eine Reduktion von CO_2-Emissionen von 80 % im Vergleich zu 1990 zu erreichen. Die Bündelung entscheidender Kompetenzen in einem „Department of Energy and Climate Change" war dieser Politikentscheidung sicherlich zuträglich. Dennoch sind die bisher erreichten Emissionsreduktionen noch weit von den signifikanten Reduktionen (global um 33-67 %) entfernt, die bis zur Mitte des 21 Jahrhunderts vom IPCC global und in höherem Ausmaß für Industrieländern als notwendig angesehen werden, um die globale Erwärmung auf weniger als 2 °C zu begrenzen (IPCC, 2007; GEA, 2012; IPCC, 2014b).

Weitere Details zu technischen Unterschieden zwischen produktions- und konsumseitigen Bilanzen werden später in diesem Kapitel, im Abschnitt 6.3.1 „Sektoren" dargelegt, siehe zur Illustration der Konzepte auch Abbildung 6.5 sowie zu Politikimplikationen Steininger et al. (2014).

Die Entwicklungstrends in Österreich werfen Fragen auf, inwieweit ambitionierte Emissionsreduktionen mit Wirtschaftswachstum vereinbar sind.

Zahlreiche internationale Organisationen wie etwa die Weltbank, die OECD und die IEA gehen nach wie vor davon aus, dass ein globales Wirtschaftswachstum im Bereich von

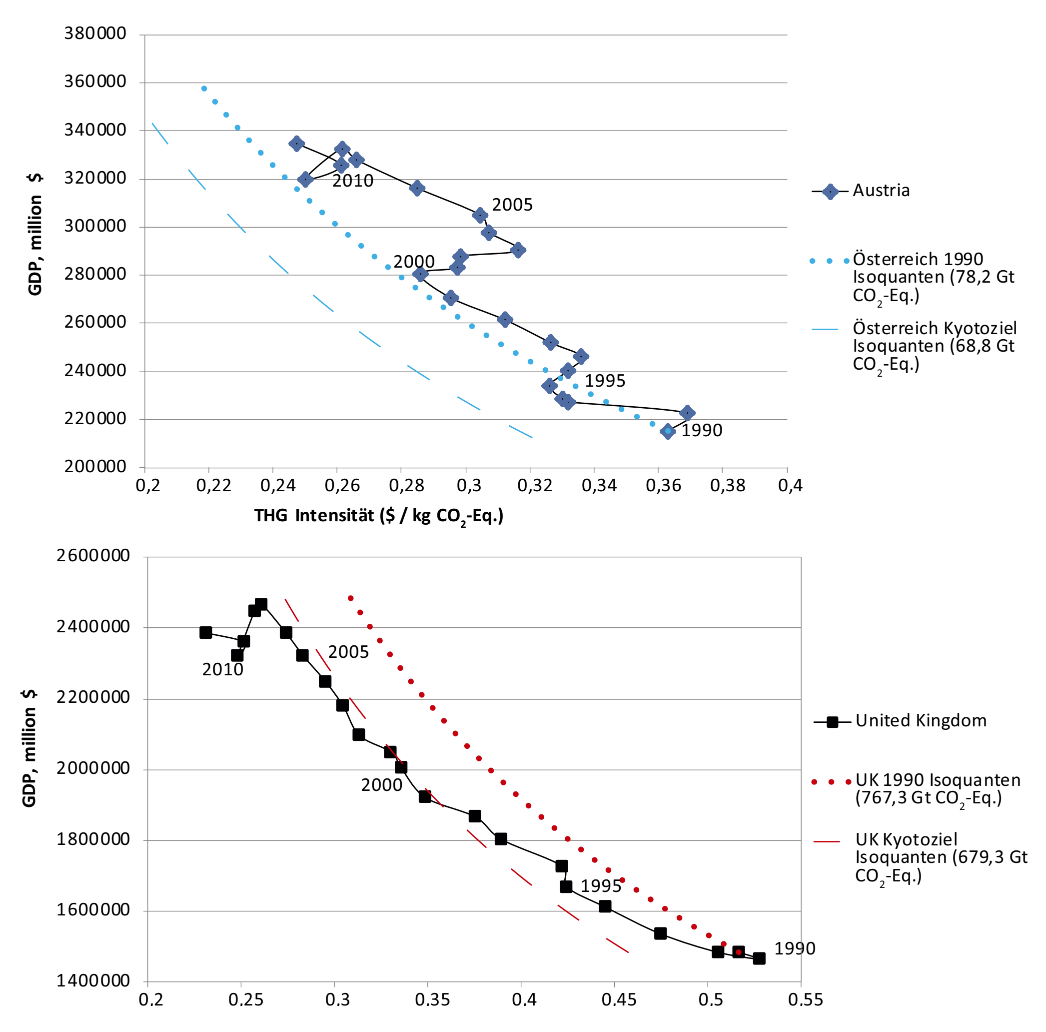
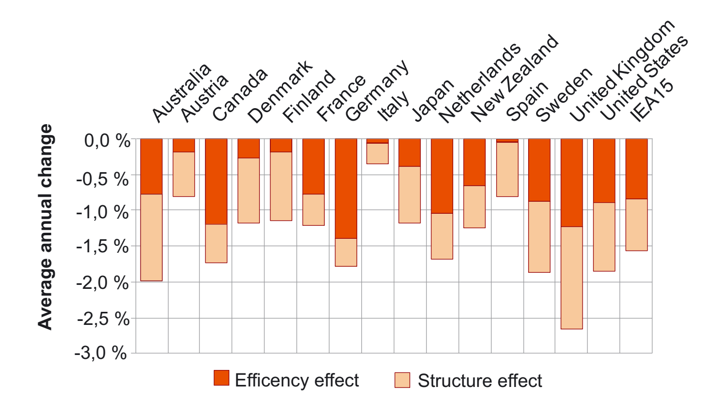


Abbildung 6.3 BIP vs. Kohlenstoffintensität, Pfadverläufe 1990 bis 2011 für Österreich (oben) und das Vereinigte Königreich (unten); Quelle: Verändert nach Mechler et al. (2010)

Figure 6.3 Trajectories of GDP vs. carbon intensity 1990-2011 for Austria (upper panel) and the UK (lower panel); Source: modified from Mechler et al. (2010)

3 % / Jahr mit einer Halbierung der globalen Emissionen von CO_2-Äquivalenten bis 2050 vereinbar sei. Dies würde für Industrieländer erfordern, ihre Gesamtemissionen um 80–95 % im Vergleich zu 1990 zu reduzieren (siehe etwa IPCC, 2007). Um diese Zielvorgaben alleine durch Energieeffizienzmaßnahmen zu erreichen, müsste die Energieeffizienz in Österreich jährlich um mehr als 3 % steigen. Bei stärkerem nationalem Wirtschaftswachstum im Bereich von 2 % / Jahr wären dann Effizienzsteigerungen von mehr als 5 % / Jahr nötig. Alternativ könnte allerdings ein Teil dieses Zieles auch durch die Dekarbonisierung der Primärenergie, etwa durch den Ausbau erneuerbarer Energien, erreicht werden. Insgesamt würden solche Annahmen von einer Verbesserung der Energieeffizienz im Bereich eines Faktors von 10 ausgehen, was selbst OptimistInnen als unrealistisch einschätzen (Hinterberger, 2009).

Insgesamt ist die Energieintensität der Österreichischen Wirtschaft in den vergangenen 20 Jahren um weniger als 1 % jährlich gesunken, wobei der Großteil dieses Rückgangs auf strukturelle Veränderungen zurückzuführen ist (siehe Abbildung 6.4), während das BIP im selben Zeitraum um mehr als die doppelte Rate wuchs. Langfristig sank die CO_2-Intensität der Primärenergie (Tonnen CO_2 / Terrajoule) im Zeitraum 1990 bis 2011 nur um etwa 0,4 % / Jahr, ebenso wenn nur die Periode 2000 bis 2011 berücksichtigt wird. Erst seit 2004 ist durch den Ausbau der regenerativen Energieträger eine Beschleunigung der Dekarbonisierung (auf –1,2 % / Jahr für den Zeitraum 2004 bis 2011) zu beobachten. Insgesamt resultierte die Entwicklung seit 1990 aber in einem netto Wachstum des Energieverbrauchs und der damit verbundenen THG-Emissionen (Sorrell und Dimitriopolous, 2008; Madlener und Al-



Energy Efficiency Market Report 2013, Executive Summary © OECD / IEA, 2013, Abb. ES.3, S. 19, Quelle: IEA indicators database

Abbildung 6.4 Jährliche Änderung der aggregierten Energieintensität in 15 IEA-Mitgliedsländern von 1990 bis 2010, zerlegt in die Komponenten Effizienzverbesserung und Struktureffekte. Quelle: International Energy Agency (2013)

Figure 6.4 Annual changes of aggregated energy intensity of 15 IEA member countries from 1990 to 2010, contributions of efficiency improvements and structural effects. Source: International Energy Agency (2013)

bott, 2011). Insgesamt betrachtet beschreitet Österreich weder einen entschiedenen Dekarbonisierungspfad, noch einen „Green Growth“ Pfad. Das simple Nachahmen von Politiken anderer Länder, wie z. B. UK wäre auch für den Klimaschutz nicht ausreichend.

6.2.3 Sozio-ökonomische Leistung und Wohlergehen messen

Für planerische und politische Entscheidungen und um sozio-ökologische Systeme in Richtung Nachhaltigkeit steuern zu können, ist es wichtig geeignete Indikatorsysteme zur Verfügung zu haben, die gesellschaftlichen Fortschritt und Wohlergehen messen. Einige Faktoren, die zur Lebensqualität beitragen, wie etwa Wohnbauaktivität, gesunde Ernährung, Gesundheitsversorgung, Bildung und Sicherheit korrelieren positiv mit dem BIP. Andererseits korrelieren auch dem Wohlergehen der Bevölkerung schadende Faktoren und Aktivitäten wie zunehmende Umweltschäden, soziale Auflösungsprozesse, mit BIP Steigerungen. Daher gibt es Bestrebungen internationaler Organisationen das BIP von der Weltbank durch weitere Maßzahlen zu ergänzen, die jene wirtschaftlichen, sozialen und Umweltumstände beschreiben, von denen das Wohlergehen der Bevölkerung eigentlich abhängt (EC, 2009). Der Human Development Index (HDI = Index für menschliche Entwicklung) der Vereinten Nationen ist ein alternativer Wohlstandsindikator für Staaten. Anders als der Ländervergleich der Weltbank berücksichtigt er nicht nur das Bruttonationaleinkommen pro Kopf, sondern ebenso die Lebenserwartung und den Bildungsgrad mit Hilfe der Anzahl an Schuljahren, die ein 25-Jähriger absolviert hat, sowie der voraussichtlichen Dauer der Ausbildung eines Kindes im Einschulungsalter.

Der Happy Planet Index (HPI) wurde im Juli 2006 von der „New Economics Foundation“ in Zusammenarbeit mit „Friends of the Earth“ Großbritannien publiziert und ist ein Index der ein Maß für die ökologische Effizienz der Erzeugung von Zufriedenheit zu bilden versucht. Dazu werden Werte für Lebenszufriedenheit, Lebenserwartung und ökologischen Fußabdruck kombiniert. Im Gegensatz zu den vorherigen erwähnten zwei volkswirtschaftlichen Indizes bezieht der HPI das Kriterium der Nachhaltigkeit mit ein.

Die OECD entwickelte den Better-Life-Index und brachte ein Kompendium zur Messung von Wohlfahrt heraus (OECD, 2011). Die Stiglitz-Sen-Fitoussi Kommission fasste die akademische Literatur zur Messung sozio-ökonomischer Leistung und Fortschritts zusammen und schlug bedeutungsreichere Indikatoren des sozialen Fortschritts und statistische Informationen dazu vor (Stiglitz et al., 2009).

„Beyond GDP“ (oder später „GDP and Beyond“) heißt die Initiative der Europäischen Kommission. Die Enquete-Kommission „Wachstum, Wohlstand, Lebensqualität – Wege zu nachhaltigem Wirtschaften und gesellschaftlichem Fortschritt in der Sozialen Marktwirtschaft“ des deutschen Bundestags (2011 bis 2013) hinterfragte die Bedeutung von ökonomischem Wachstum für Wirtschaft und Gesellschaft, analysierte die Möglichkeiten und Grenzen einer Entkopplung von Wachstum, Ressourcenverbrauch und wirtschaftlichem Fortschritt und entwickelte einen holistischen Indikator für Wohlergehen und Fortschritt (NWI = Nationaler Wohlfahrtsindex), der jedoch vom BIP ausgehend berechnet wird.

Die nationalen Statistikagenturen spielen in diesem Prozess eine bedeutende Rolle. Das britische ONS begann 2010 ein Arbeitsprogramm mit dem Titel „Measuring National Wellbeing“. Die Statistik Austria reorganisierte und veröffentliche relevante Datenreihen unter dem Titel „Wie geht's Österreich?“. In Österreich wurde eine von einer großen Anzahl von Stakeholdern getragenen Initiative „Wachstum im Wandel“ initiiert und sie wird mit Veranstaltungen gepflegt (siehe Box 6.1).

Box 6.1: Die österreichische Initiative „Wachstum im Wandel"
Box 6.1: The Austrian initiative „growth in transition"

Wachstum im Wandel ist eine Initiative des österreichischen Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft („Lebensministerium"), die 2008 als interaktiver Dialog initiiert wurde. Das Ministerium und ca. 20 politikrelevante Partnerorganisationen bearbeiten diverse Fragen (1) wie etwa tatsächlicher Wohlstand gestaltet sei; (2) wie ein Wirtschafts- und Finanzsystem gestaltet sein könnte, dass die ökologischen Rahmenbedingungen berücksichtigt; (3) wie alternative Entwicklungspfade, die sich auf Verbesserung der Lebensqualität konzentrieren, realisiert werden könnten; (4) welches Wachstum wir als Gesellschaft wollen?

2010 brachte eine Konferenz zum Thema „Wachstum im Wandel" in Wien 600 TeilnehmerInnen aus 15 Ländern zusammen, um Themenbereiche wie das Finanzsystem, Wachstum und Ressourcenverbrauch, soziale Gerechtigkeit und Armut, regionale Aspekte und Konzepte der Lebensqualität, sowie Fragen der Wohlstandsmessung zu diskutieren. Ende 2012 fand die zweite internationale Konferenz zu dem Thema in Wien statt (Growth in Transition, 2012).

Was Wachstum im Wandel einzigartig macht, ist die aktive Beteiligung verschiedener Ministerien an der Gestaltung. Die Frage, welche Art von Wachstum langfristig ökologisch und sozialverträglich ist, hat an Akzeptanz gewonnen. VertreterInnen des Bundeskanzleramts bestätigten den Erfolg des Bestrebens von „Wachstum im Wandel", Nachhaltigkeitsfragen aus der Umweltecke herauszubringen und zu zeigen, dass Nachhaltigkeit eine Querschnittmaterie ist, das über Wirtschafts- und Finanzsysteme bis hin zu Sozial- und Arbeitsmarktpolitik viele Bereiche berührt (Trattnigg, 2012), siehe auch http://wachstumimwandel.at/

6.3 Visionen und Pfade
6.3 Visions and pathways

6.3.1 Sektoren

Wie in Kapitel 3, Band 3 bereits im Detail dargelegt, wurde für Österreich eine Reihe von mittel- und langfristigen Szenarioanalysen durchgeführt, die sich anhand von unterschiedlichen Modellen und Methoden der Transformation in Richtung Klimaverträglichkeit widmen. Solche modellbasierten Studien sind nützlich um die Gesamtwirkung und Interaktion verschiedener Klimaschutzmaßnahmen besser beurteilen zu können und um abschätzen zu können, welche nationalen Emissionsreduktionen Österreich zum Einhalten des 2 °C Ziels beitragen könnte. In der Einleitung dieses Kapitels wurde dargelegt, dass um das globale 2 °C Ziel mit hoher Wahrscheinlichkeit zu erreichen, ein deutlicher Schritt in Richtung Dekarbonisierung der Wirtschaft bis Mitte des aktuellen Jahrhunderts nötig ist. Nur relativ wenige der im Folgenden dargestellten Szenarioanalysen erstrecken sich bis 2050. Bisher sind sie vor allem auf das Energiesystem im engeren Sinne beschränkt und modellieren oft nur CO_2 aus fossilen Energieträgern, aber nicht das volle Kyoto-Portfolio an THG, inklusive z. B. der landnutzungsbezogenen Emissionen. Insbesondere in der ökonomischen Analyse der Transformation der Energiesysteme bestehen in diesen Studien allerdings noch erhebliche Lücken. So bleiben bisher einige wichtige Fragen der Kosten-Nutzen Verteilung offen. Nur indirekt wird beschrieben wer die „GewinnerInnen" und „VerliererInnen" der Transformation sind, wo Besitzstände gewisser Interessengruppen gefährdet sind und dementsprechend mit Widerständen zu rechnen ist, bzw. welche Technologiezweige unter ernsthaften Klimaschutzbedingungen obsolet werden, sowie andererseits in welchen Bereichen/Regionen wesentliche Wachstumsbranchen liegen, bzw. welche politischen, sozialen und ökologischen Rahmenbedingungen zum effektiven und fairen Umbau des Wirtschaftssystems erforderlich sein werden.

Für drei dieser Studien (Steicher et al., 2010; Christian et al., 2011; Bliem et al., 2011; vgl. auch Band 3, Kapitel 3) wurden in einer vergleichenden Übersicht die grundlegenden Eckpunkte, Szenario-Annahmen, sowie in einer tabellarischen Übersicht die zentralen Ergebnisse zusammengefasst. Insgesamt kann zu diesen Studien gesagt werden, dass sie allesamt bedeutende Möglichkeiten zur Reduktion des energetischen Endverbrauchs um etwa 50 % bis 2050 sehen (siehe Abbildung 6.5).

Hohes Reduktionspotenzial wird beim Energiebedarf in Gebäuden gesehen, der derzeit 28 % des energetischen End-

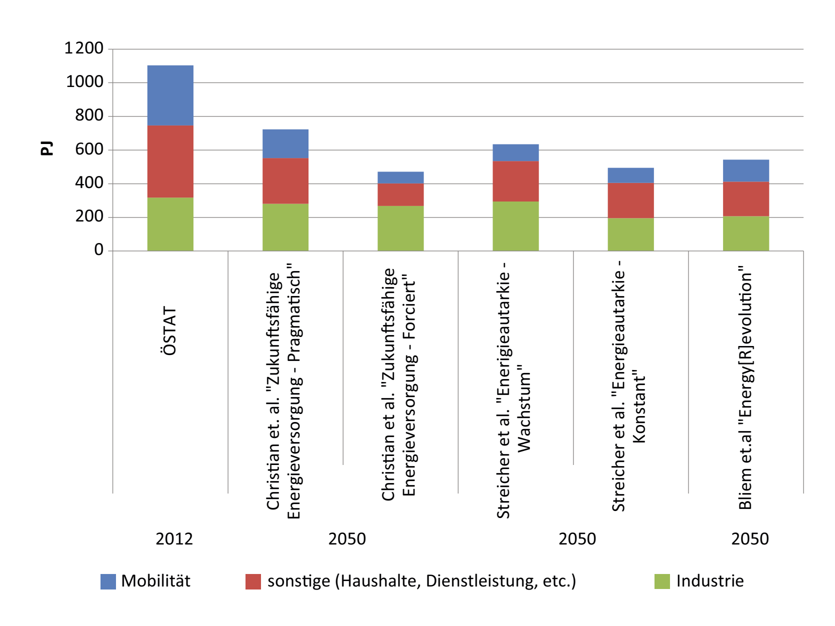


Abbildung 6.5 Vergleich des Energetischen Endverbrauchs nach Sektoren 2012 und 2050 in verschiedenen Szenarien. Quelle: Eigene Darstellung, basiert auf Steicher et al. (2010); Christian et al. (2011); Bliem et al. (2011)

Figure 6.5 Comparsion of final energy use across sectors and different scenarios. Source: based on Steicher et al. (2010); Christian et al. (2011); Bliem et al. (2011)

verbrauchs ausmacht (siehe auch Band 3, Kapitel 5). Allerdings ist dieser Verbrauchssektor nicht in allen Studien separat ausgewiesen, sondern wird teils nur aggregiert mit dem Dienstleistungssektor berichtet. Praktisch alle Szenarien gehen von ambitionierten Möglichkeiten zur Verbesserungen des thermischen Gebäudebestands aus (oft mehr als 3 % Sanierungsrate p. a.), sodass dieser bis 2050 praktisch durchwegs Passivhausstandard aufweist.

Die relative Bedeutung von Elektrizität als Energieform nimmt in allen Szenarien weiterhin zu, in den meisten Szenarien (siehe Tabellen 6.3, 6.4 und 6.5), wird sogar mit einem absoluten Wachstum der Stromnachfrage gerechnet. Ein wesentlicher Treiber dieser Entwicklung ist der vermehrte Einsatz von Wärmepumpen zum Heizen, aber auch der Verkehrssektor, was einen deutlichen Strukturbruch gegenüber der historischen technischen Entwicklung der Antriebstechnik bedeutet. Mit der Elektrifizierung des Verkehrssektors sinkt wegen der höheren Umwandlungseffizienz durchwegs dessen Anteil am Gesamtverbrauch von derzeit über 32 % der Endenergienachfrage auf etwa 15–24 %.

Im Industriesektor wird in den Studien davon ausgegangen, dass die Energieeffizienzpotenziale bereits weitgehend ausgenutzt sind und es wird weniger Spielraum für verbleibende Reduktionsmaßnahmen gesehen, wobei sich die Szenarien hinsichtlich zukünftiger Wachstumsaussichten dieses Sektors unterscheiden. Insgesamt nimmt dessen Bedeutung an der Energienachfrage durchwegs zu (von gegenwärtig 29 % auf 38–57 % der Endenergienachfrage in 2050.

Auch hinsichtlich des Potenzials erneuerbarer Energiequellen sind die meisten Studien optimistisch, auch wenn sie die zukünftigen Potenziale einzelner Technologien (insbesondere Biomasse) recht unterschiedlich bewerten. Sowohl die Stromerzeugung als auch die Wärmegewinnung aus erneuerbaren Quellen werden gegenwärtig von je einem Energieträger dominiert (Wasserkraft und feste Biomasse), deren Potenziale bereits weitgehend genutzt werden. Im Bereich Wasserkraft werden Ausbaumöglichkeiten vor allem bei Kleinwasserkraftwerken gesehen (siehe Band 3, Kapitel 2 und Band 3, Kapitel 3), wenngleich die negativen Auswirkungen auf Ökosystemdienstleistungen seit Jahrzehnten für Widerstand durch Umweltorganisationen sorgen. Bei der Biomassenutzung sind hohe Erwartungen vor allem an Biokraftstoffe der zweiten Generation geknüpft, bei denen nicht die Hauptfeldfrüchte (wie bei Raps oder Mais), sondern Erntenebenprodukte verwendet werden und so potentielle Nutzungskonflikte mit der Nahrungsmittelproduktion und Naturschutzzielen abgemildert werden. Darüber hinaus sind jedoch verschiedene alternative erneuerbare Energiequellen verfügbar, die durch rapide fortschreitende Technologieentwicklung zunehmend ökonomisch attraktiv werden. Erhebliche Zuwächse werden im Bereich Photovoltaik erwartet und auch der Windenergie werden rasch erschließbare und kosteneffiziente Potenziale zugeschrieben. Wegen des bereits hohen Anteils an Wasserkraft in Österreich und der Existenz zahlreicher Pumpspeicher ist die Herausforderung der Netzintegration fluktuierender Erzeuger in Österreich einfacher zu bewerkstelligen als in den Netzwerken der Nachbarländer, die auf große thermische Kraftwerke zur Bereitstellung von Grundlast optimiert sind.

Die in Abbildung 6.5 zusammengefassten Ergebnisse der unterschiedlichen Szenarienanalysen sind insgesamt relativ

optimistisch bezüglich der „Machbarkeit" einer Transformation des Energiesystems zur Klimaverträglichkeit. Im folgenden Abschnitt werden darüber hinaus ergänzende relevante Unterschiede in den Modellierungsansätzen, Annahmen und Resultaten dargestellt, die zu einer differenzierten Betrachtung der Modellergebnisse beitragen sollten.

So beschreibt Tabelle 6.1 vergleichend die Unterschiede in den Eckpunkten und Modellierungszielen der verschiedenen Studien.

Zum Beispiel unterscheiden sich die Modelle etwa in den folgenden Kriterien:

- der möglichen Berücksichtigung von internationalem Transport und / oder „Kraftstoffexport im Tank"
- den Definitionen der Sektoren (z. B. „Gebäude" oder separat „private Haushalte" und „Dienstleistungssektor"; „Industrie" oder separat „Sachgüterproduktion" und „Landwirtschaft", sowie ob und wie detailliert der Energieumwandlungssektor dargestellt wurde)
- den zugrundeliegenden Annahmen der Ressourcenpotenziale für erneuerbare Energiequellen in Österreich, (technische-, ökonomische- und nachhaltige Potenziale, sowie wie diese voneinander abgegrenzt wurden, und ob diese statisch oder dynamisch betrachtet werden)
- den Annahmen der technologischen Entwicklung im Energiesektor, (z. B. Entwicklung von Elektromobilität, neuartigen Energiespeichern, flüssigen Kraftstoffen der zweiten Generation)
- den Annahmen zu Fortschritten der Prozesstechnologie und Energieeffizienz in verschiedenen Wirtschaftssektoren (z. B. Stahlerzeugung, Zellstoff und chemische Industrie), sowie der zukünftigen Nachfrage nach deren Produkten; ebenso wie Fortschritt in der Wärmedämmung im Gebäudebestand, etc.
- den Fragen der Kostenentwicklung konventioneller Energieträger (z. B. Öl, Gas), von Umwandlungstechnologien und insbesondere von erneuerbaren Technologien (z. B. Photovoltaik, Windenergie)
- Fragen der Begrenzung auf das Energiesystem im engeren Sinne. Sprich ob nur auf CO_2-Emissionen, oder auch CO_2-Äquivalente Emissionen aus der Landnutzung und Industrieprozessen sowie der Abfallwirtschaft abgezielt wird
- Annahmen zur Dynamik grundliegender Treiber wie Bevölkerungs- und Wirtschaftsentwicklung, Marktintegration mit dem „Rest der Welt"
- Fragen der Szenarien-Philosophie und „Storyline", z. B. Ausmaß und Ernsthaftigkeit der Politikmaßnahmen, Verhaltensänderung und Wertewandel der Bevölkerung (z. B. Ernährungspräferenzen, Mobilitätsbedarf), Anstreben von nationaler Unabhängigkeit der Energieversorgung oder Ausweitung von Handel und europäische Netzintegration, Annahmen zu Emissionspreisen, denkbaren Strukturbrüchen
- Unterschieden im zugrundeliegenden Basisjahr
- Unterschieden in der Komplexität des simulierten Energiesystems (z. B. Anzahl an berücksichtigten Prozessen, Energieträgern, Umwandlungstechnologien, räumlichen und zeitlichen Auflösung)

Tabelle 6.2 fasst darüber hinaus vergleichend Unterschiede der Studien in wesentlichen Grundursachen (Treibern) der Energienachfrage zusammen. So geben zum Beispiel, Streicher et al., (2010) keine präzise Angaben über die BIP-Entwicklung, auch in Christian et al. (2011) sind keine detaillierten Angaben vorhanden, und in Bliem et al. (2011) wird nur in einem Szenario („Sharing Scenario") angegeben, dass das Österreichische BIP um 34 % bis 2050 steigt.

In den weiter unten folgenden Tabellen 6.3, 6.4 und 6.5 werden quantitative Ergebnisse der einzelnen Studien zusammengefasst und kurz kommentiert.

Die Untersuchung von Streicher et al. (2010) unter dem Titel „Energieautarkie für Österreich 2050" zielt vor allem auf die technische Möglichkeit einer völligen Versorgung mit heimischen Energiequellen bis 2050 ab. Wesentliche Eckpunkte dazu sind in Tabelle 6.1 zusammengefasst, Ergebnisse in Tabelle 6.3. Auf der Angebotsseite konzentriert sich die Studie auf Untersuchungen zu den technischen Potenzialen erneuerbarer Energieträger. Auf der Nachfrageseite, beschreibt sie zwei alternative Szenarien: (1) Wachstum der Nachfrage an Energiedienstleistungen um 40 %, und (2) konstante Nachfrage (allerdings in beiden Fällen unter der Annahme deutlicher Verbesserungen der Endnutzungseffizienz). Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass bis 2050 durch Effizienzsteigerungen die Endenergienachfrage im Gebäudebereich im Vergleich zu 2008 etwa um 50 %, reduziert werden könnte, jene für Mobilität um etwa 70 % und im Bereich der Industrieproduktion um etwa 35 % bis 2050. Diese Effizienzsteigerungen erhöhen allerdings in vielen Bereichen die Nachfrage nach Elektrizität als Energieträger, insbesondere im Verkehrssektor und zum Betrieb von Wärmepumpen in der Gebäudetechnik. Die Endenergienachfrage Österreichs insgesamt kann laut dieser Studie um 39 %, bzw. 53 %, reduziert werden, auf entweder 650 oder 500 PJ in 2050. Die Studie berücksichtigt, dass etwa im Bereich Wasserkraft und Biomasse ein großer Teil der bestehenden erneuerbaren Energiepotenziale bereits genutzt wird. In anderen Bereichen wird davon ausgegangen, dass techni-

Tabelle 6.1 Eckpunkte in Studien von Streicher et al., 2010; Christian et al., 2011; Bliem et al. 2011
Table 6.1 Central assumptions in studies of Streicher et al., 2010; Christian et al., 2011; Bliem et al. 2011

Studie	Fragestellung / Ziel	Sektorenaufteilung	Szenarien: BAU, Referenz, Aktionen: produktions- und konsumseitige Bilanzierung gewählt?	Modellierte Indikatoren
Streicher et. al. (2010)	Ob und wie ist in Österreich vor dem Hintergrund des klimapolitischen Zieles einer Absenkung der THG-Emmissionen um 80–95 % (2°-Begrenzung) bis 2050 und der zunehmenden Verknappung bei fossilen Energieträgern Energieautarkie technisch machbar? Annahme: Ziele implizieren 100 %ige Versorgung Österreichs mit erneuerbaren Energieträgern.	**Mobilität** (Privat- / Güterverkehr)	Basisjahr 2008 (Endenergiebedarf: 1 100 PJ)	Energiedienstleistungsbedarf je Sektor, soweit anwendbar (nicht für Produktion)
		Gebäudebereich (Wohn- / Dienstleistungsgebäude)	Konstantszenario (Bedarf an Energie-DL und gesamte BWS der Industrie 2050 am Niveau des Basisjahres 2008)	Mobilität (Personenverkehr: km / a, Güterverkehr: tkm / a)
		Produktionsbereich (Industrie)	Wachstumsszenario (Wachstum der Energie-DL bzw. BWS der Industrie: bis 2050 +0,8 % p. a.; entspricht +40 % insgesamt) >> Entkopplung zw. Wachstum E-DL und WW.	Gebäude (m^2 konditionierter Wohn-, Büro und Gewerbenutzflächen)
			Effizienz-Wachstum (wie Wachstumsszenario mit erhöhter Effizienz) – nur für Verkehr und Gebäude berechnet.	Produktion (Bruttowertschöpfung; Energiebedarfskategorien nach ÖNACE)
			Sowohl aufkommens- als auch verbrauchsseitge Bilanzierung (siehe Ergebnisse)	
Christian et al. (2011)	Inwieweit, wie und unter welchen technischen Rahmenbedingungen kann die Energieversorgung Österreichs langfristig durch die dann ausschließlich verfügbaren erneuerbaren Energieträger gesichert und inwieweit können dabei Einschränkungen vermieden werden, eventuell sogar bei steigender Lebensqualität?	**Mobilität** (Personenverkehr / Güterverkehr)	Basisjahr 2005	Energiedienstleistungen (nach Energieträgern bzw. Nutzenergiekategorien je nach Anwendbarkeit), unterschiedliche Parameter für die 2 Szenarien (SP, SF)
				Mobilität, Verkehrsleistung (Wegzahl, -längen), spezifischer Verbrauch, Modal Split
		Private Haushalte	Business as usual: Keine wesentlichen Änderungen der bisherigen Trends (Extrapolation)	Haushaltsgeräte: Ausstattungsgrad, mittlerer Verbrauch, Austauschrate, Heizwärmebedarf (kWh / m^2a) je Sanierungsgrad, Sanierungs-, Abriss-, Neubauraten

<table>
<tr><th>Modellierte Technologien: Prozesstechnik in Industrie, Transport und Haushaltstechnik</th><th>Berechnungsmethode / -tool</th></tr>
<tr><td>Konservativ:
nachfrageseitig nur schon 2008 bekannte Technologien einbezogen (angebotsseitig auch sehr wahrscheinliche); neue (verbrauchsärmere) Energietechnologien und Einsparungen durch Effizienzsteigerung ermöglichen höheres Potential der erneuerbaren Energieträger (bzw. niedrigeren Endenergiebedarf). Endenergiebedarf ergibt sich aus Effizienzerhöhung (=Energieeinsparung) und verbrauchsärmeren neuen Technologien.</td><td rowspan="5">Energieflussdiagramm

Fixe Parameter:
Potentiale der Energieträger
Endenergiebedarf der Sektoren
Nutzungsgrad der Technologien

Variable Parameter:
◦ Ausnutzungsgrad der Potentiale der EET
◦ Aufteilung der Stromerzeugung aus Wasser, Wind, PV und tiefer Geothermie (in direkte Nutzung bzw. Erzeugung von Gas und längerkettigen Kohlenwasserstoffen aus elektr. Energie und CO_2 der Atmosphäre oder abgetrenntem CO_2 aus Verbrennungsprozessen von Biomasse)
◦ Aufteilung der Biomasse in KWK, Nieder- u. Hochtemperaturwärme sowie Biofuels (Kraftstoffe u. Methan)
◦ Jew. Anteil d. versch. Endenergieträger für Sektoren</td></tr>
<tr><td>(Industrie-)Produktion:
Effizienzverbesserung 1 % p. a. (lt. Vorgaben der Engergieeffizienzrichtlinie der EU) mit anschließender Substitution fossiller durch erneuerbare Energieträger.
Endenergiebedarfsbereiche: elektrochemische Zwecke, mechanische Anwendungen, thermisch (Nieder-, Mittel-, Hochtemperatur für Prozesse und Beheizung)
Energiekategorien: Fossile Kraftstoffe 2050 nicht mehr eingesetzt</td></tr>
<tr><td>Verkehr:
Beide Szenarien: spezifische Verbrauchswerte sinken (kWh / km), individuelle Mobilität trotzdem teurer.
Flottenmix 2050 mit durchgehender Hybridisierung bei PKW mit VKM; Reduktion der Fahrzeuggröße, VKM-Antriebsleistung und Tempolimits. Elektro-PKW als Kleinwagen.
Weitere Optimierung bei Nutzfahrzeugen, 100 %ige Elektrifizierung der Bahn.
Reduktion der Verkehrsnachfrage um 10 %
Verschiebung des Modal Split.</td></tr>
<tr><td>Gebäude:
Umfassende thermische Sanierung (Rate mind. 3 % p. a.) → Rebound Effekt?
Effizienzsteigerungen bei elektr. Geräten
Veränderung des Nutzerverhaltens
Energieträgermix Heizung/Warmwasser: ca. 50 % Wärmepumpen, max. 10 % Biomasse, keine fossilen Energieträger und kein Strom, 30–40 % Solarthermie</td></tr>
<tr><td>Umwandlungsbereich:
Wärme (aus Biomasse, Wärmepumpen aus oberflächennaher Umweltwärme und Strom, Solarthermie, tiefer Geothermie)
Elektrizität (aus Biomasse über KWK, Wasserkraft, Wind, PV, tiefe Geothermie mit WK-Prozessen)
→ Relativ neue Technologien hervorgehoben:
◦ Bioethanol aus Biomasse
◦ 2nd generation fuels
◦ Kraftstoffe u. CH_4 aus Elektrizität und CO_2</td></tr>
<tr><td>Keine noch nicht bekannten bzw. konkret erwartbaren Techniken berücksichtigt.</td><td rowspan="3">Aufkommensseite:
Backcasting (Ableitung notwendiger Schritte aus Vergleich Ist-Situation mit geplanter langfristiger Energiezukunft).
◦ Literaturrecherche, Experteninterviews, Workshops, Best-Practice Beispiele.
◦ Abschätzung der Bandbreiten von Potentialen erneuerbarer Energieträger (ökologisch und sozial verträglich).
◦ Energiedienstleistungen d. Basisjahres
Modell unter Einbeziehung aller Aggregate der Gesamtenergiebilanz
→ Energieflussdiagramme für alle Szenarien

Einteilung der Bilanzaggregate nach:
◦ Energieträgerklassen
◦ Sektoren (Verbrauch Sektor Energie, Energie Endverbr.)
◦ Für EEV 7 Nutzenergiekategorien
◦ Umwandlung: Art der Anlage

Nachfrageseite:
Bottom-Up-Modellierung, Orientierung an Nutzenergieanalyse, strukturelle Änderungen berücksichtigt</td></tr>
<tr><td>SF: 100 % Elektromobilität</td></tr>
<tr><td>Haushaltsgeräte, Klimaanlagen, Raumheizung, Beleuchtung
SP: Niedrigenergiehausstandard
SF: Passivhausstandard
Für Kategorie „Zukunftsgerät“ Verbrauch reserviert.
Mögliche Rebound-Effekte abgebildet.
Energiesparlampen 2020, LED 2050 (o. ä.)</td></tr>
</table>

Studie	Fragestellung / Ziel	Sektorenaufteilung	Szenarien: BAU, Referenz, Aktionen: produktions- und konsumseitige Bilanzierung gewählt?	Modellierte Indikatoren
Christian et al. (2011)		**Dienstleistungsbereich**	Szenario Pragmatisch (SP) 2020, 2050 Bruch mit aktuellen Trends, Bewusstseinswandel Heute verfügbare Effizienzpotentiale nicht in vollem Umfang genutzt. Bevölkerungsvariante 1 (Zuwachs, Annahmen zu Altersverteilung, Siedlungsstruktur gleich wie in BV 2)	Beschäftigtenzahl, Sanierungs-, Neubau- (Heizwärmebedarf) und Abrissrate, Effizienzfaktor, Ausstattungs- und Austauschrate, Ladenöffnungszeiten, Fläche
		Sachgüterproduktion	Szenario Forciert (SF) 2020,2050 Bruch mit aktuellen Trends, weitreichender Bewusstseinswandel (Bevölkerung, Politik, Verwaltung, …) Heute verfügbare Effizienzpotentiale zu 100 % genutzt. Bevölkerungsvariante 2	Wirkungsgrade, Produktpalette (produktionsbedingter Energieeinsatz)
		Landwirtschaft	Sowohl aufkommens- als auch verbrauchsseitge Bilanzierung (siehe Ergebnisse)	k. A.
Bliem et al. (2011)	Wie muss sich der Energieverbrauch der einzelnen Sektoren ändern, um im Jahr 2050 über 80 % des energetischen Endverbrauchs mittels erneuerbaren Energieträgern zu decken und gleichzeitig mehr als 90 % der CO_2-Emissionen im Vergleich zu 2008 einzusparen?		Basisjahr 2010	(Energieträgermix, Nutzenergiekategorien)
		Private Haushalte	Annahmen zu Potentialen der EET basieren überwiegend auf Energy Economics Group (2008), tw. selbst modelliert.	Treiber u.a. Bevölkerungsentwicklung, Anzahl HH, Personen / HH, Ausstattungsgrad, energetischer Standard Gebäudehülle, … Heizenergiebedarf, Kochen, Warmwasser, Geräte, EDV, Raumkühlung, -wärme, Wärmepumpen, Solaranlagen
		Dienstleistungen	Nachfrage: Übernahme geeigneter Szenarien aus jeweiligen Studien, überwiegend des Steering Szenario aus „Visionen 2050", EA (2010)	Treiber u. a. wirtschaftl. Aktivität (Bruttowertschöpfung), Beschäftigung, Gebäudenutzung und -ausstattung
		Produzierender Bereich	Sowohl aufkommens- als auch verbrauchsseitge Bilanzierung (siehe Ergebnisse)	Bruttowertschöpfung (Anteil der Sektoren), Energieintensität
		Verkehr		Flottenanteil von reinen Elektro-FZ bzw. Plug-In Hybrid-FZ Attraktivität Infrastruktur Fuß+Rad, Schiene+ÖPNV: Reisegeschwindigkeit, Dichte Linien+Haltestellen, Fahrpreis ÖV, PKW-Geschwindigkeit, Kosten je FZ-km (Treibstoffe), Pkm, Tkm, Energieeffizienz (kWh /Pkm, kWh / Tkm)
		Landwirtschaft		Produktionswert, Biobetriebe, Betriebsgröße, Flächen, Anteil Energiepflanzen, Dünge- und Pflanzenschutzmittel, Treibhausgasemissionen

Modellierte Technologien: Prozesstechnik in Industrie, Transport und Haushaltstechnik	Berechnungsmethode / -tool
Raumheizung, Warmwasser, Kochen, Klimaanlagen, Beleuchtung, EDV / Büroautomation, Dampferzeugung, Industrieöfen, Elektr. Groß- / Kleingeräte, Standmotoren	
Raumheizung, Klima, WW, Damperzeugung, Industrieöfen, Standmotoren, Beleuchtung & EDV, elektrochem. Zwecke	
(Schlechte Datenlage) Energetischer Endverbrauch konstant, nur Energiemix auf EET umgestellt	
Umwandlungsbereich: 2050 Kokerei durch Köhlerei ersetzt Bioraffinerie (Abschätzung schwierig) 2050 Öl durch EET ersetzt (Holzöl, Biogas, -masse)	
	Literaturrecherche / Studien (national / international) Vorwiegend: Annahmen zu Endenergieverbrauch aus: „Visionen 2050", Öst. Energieagentur (2010) Prognos und Öko-Institut e.V. (2009) Energy Technology Perspectives (IEA, 2010) Energy Economics Group (2008)
Ausbau von Fernkältenetzen, Wärmepumpen Verbesserungen von energetischen Gebäudestandards und Energieeffizienz von Geräten	
Potentiale für Energieeinsparungen: v. a. Gebäude: Fassaden, Dämmung, Kühlung, Belüftung, Verschattung, … Sinkende Energieintensitäten für RW und RK, elektrische Geräte, Beleuchtung, EDV, Nutzung Umgebungswärme steigt stark	
Biomasse zur Wärmebereitstellung in der Industrie Strom ersetzt tw. durch neue Verfahren und Prozesse andere Energieträger (v. a. wegen Ölpreis) Potentiale für Energieeinsparungen: v. a. Wärme, Lüftung, Kühlung, Dampferzeugung, Beleuchtung, EDV, …	
Elektrifizierung des Verkehrs, biogene Brennstoffe nur als Übergang bzw. im Schwerverkehr und für Flugzeuge Gütertransport: bevorzugt Bahn	
Umwandlungsbereich: KEINE Abscheidung und Speicherung von CO_2	

Tabelle 6.2 Annahmen zu Treibern in Studien von Streicher et al. (2010); Christian et al. (2011); Bliem et al. (2011)
Table 6.2 Assumptions regarding drivers in studies from Streicher et al. (2010); Christian et al. (2011); Bliem et al. (2011)

Studie	Demografie	Heizgradtage	Transport
Streicher et al. (2010)	+0,3% p. a. bis 2050	bis 2050 etwa −20% (durch Rebound Effekt wegen gesunkener Heizkosten wieder aufgehoben)	Verlagerung des Modal Split (v. a. Richtung Schiene und Nicht-Motorisierter-Verkehr) Reduktion des Flottenverbrauchs Hohe Anteile an Elektrofahrzeugen im PKW-Verkehr
Christian et al. (2011)	Bevölkerungsvariante 1 (Szenario Pragmatisch): 2020 +5,7%/2050 +15,7% Bevölkerungsvariante 2 (Szenario Forciert): 2020 −4%/2050 −8,9% Berücksichtigung der Verteilung nach Gemeindegrößenklassen, Altersstruktur und Beschäftigungsarten	Bei HGT-Korrektur Querschnitt der Jahre 2001 bis 2006 herangezogen, weil dieser drei „kalte“ (2001, 2003, und 2005) und drei „warme“ Jahre (2002, 2004, 2006) enthält. Um einen allfälligen allgemeinen Verbrauchsanstieg zu berücksichtigen, wurden additive Korrekturterme eingefügt.	
Bliem et al. (2011)	Bevölkerungsprognose lt. Statistik Austria 2050: 9,5 Mio. Einwohner Stärkere Zunahme der Altersgruppen 60+ als −15		Steigende Verkehrsleistung im Öffentlicher Verkehr, Rückgang des Motorisierter Verkehr + Güterverkehr (v. a. Bahn) Biotreibstoffe im Flugverkehr Effizienzsteigerung konventioneller Antriebe und Umstieg auf neue Konzepte (Elektrifizierung des Verkehrs, Biokraftstoffe, Brennstofftechnologien) Nachhaltige Raumordnung und -entwicklung (auch Siedlungen, kurze Wege) Geändertes Mobiltiätsverhalten Hohe Ölpreise, Klimaabgabe auf fossile Treibstoffe

sche Innovationen zu einer Potenzialerweiterung führen, etwa in den Bereichen Solarthermie, tiefe Geothermie, Photovoltaik, Wärmepumpen (oberflächennah), und Windkraft. Insgesamt werden bis 2050 die technischen Potenziale bei über 800 PJ (507 PJ +84 TWh) angesetzt, von denen in den Szenarien über 80 % genutzt werden. Eine systematische Abgrenzung von technischen Potenzialen zu wirtschaftlich erschließbaren oder dann nachhaltig nutzbaren Anteilen erfolgt allerdings nicht. Während sich die Studie weitgehend auf die „Machbarkeit“ und technische Energiepotenziale konzentriert, weist sie gleichzeitig darauf hin, dass es politischer Willenserklärungen und ökonomischer Steuerungsmaßnahmen bedarf, um eine Transformation zur Klimastabilisierung zu erreichen, inklusive der nötigen Investitionen in Infrastrukturen (besonders im Bereich Mobilität, Netzausbau, Speicherung) und nicht zuletzt bezüglich der öffentlichen Akzeptanz.

Politik	Energiewirtschaft	Landwirtschaftlich genutzte Flächen	Gebäudenutzflächen
Ökonomische Instrumente (Energiepreise) Vorschriften Infrastrukturinvestitionen (Mobilität, Stromnetz, Energiespeicher) Energieforschung Verbot des Einsatzes fossiler Energieträger zur Beheizung Bewusstseinsbildende Maßnahmen	Ausbau Energiespeicherkapazitäten (für Österreich nur im Sommer) Pumpspeicherkraftwerke oder chemische Speicher; Regenerativ erzeugtes Methan; Smart Grids; Erneuerung Übertragungs- und Verteilnetze (dezentrale Stromerzeugung, neue Erzeugungsschwerpunkte) Import-/Exportsaldo über das Jahr Null (Annahme: Netto-Energieimport von grauer Energie in Gütern nimmt nicht weiter zu) Energie Preise: ◦ Anreiz zur Änderung des Nutzerverhaltens ◦ Falls sich Wirtschaftlichkeit von erneuerbaren Energieträgern nicht über Energiepreise reguliert, sollten Anreize geschaffen werden	Für Nahrungsmittelproduktion konstant Für Biomasse nur Überschussflächen genutzt	Konstantszenario: Wohnungsmangel Wachstumsszenario: Bedarf gedeckt
Bewusstseinsbildung Anreize schaffen (ordnungsrechtliche Vorgaben, finanzielle Attraktivität, Information)	Verbesserte Speichertechnik (Winterloch) Frage der Verwendung von Pumpspeicherkraftwerken (nationaler oder auch internationaler Ausgleich von Schwankungen) Importe/Exporte betrachtet	Konkurrenz zwischen Lebensmittelproduktion und energetischer Nutzung der Biomasse verschärft sich. Lösung dieses Problems stellen integrierte Systeme dar, in denen der Ertrag eines Feldes teils als Lebensmittel, teils auch als Energieträger dient.	Im Bereich der Wohngebäude wurden als maßgebliche Faktoren für den Energieverbrauch die thermische Sanierung, der Abriss und der Neubau betrachtet.
Ökologisierung des Steuersystems (Internalisierung externer Kosten) Verbindliche Ziele für Reduktion der THG, Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energieträger, Steigerung der Energieeffizienz Planungssicherheit für Unternehmen und Investoren schaffen Thermische Wohnraumsanierung European Trading System: Reduktion Emissionsobergrenzen; Aufnahme zusätzl. Sektoren und Emittenten; Vollständige Abschaffung der kostenlosen Zuteilung von Zertifikaten Ausweitung der Energieforschung	Smart Grids/Super Grids Dezentrale Energieerzeugung und Speicher Höhere Preise für fossile Energieträger Optimale Einspeisung von Erneuerbare Energieträger in Elektrizitätsnetze Deckung des gesamten Bedarfs an Elektrizität und Fernwärme aus Erneuerbare Energieträger Netzparität für PV-Elektrizität	Rückgang landwirtschaftlich genutzter Flächen Zunahme Energiepflanzenflächen Konkurrierende Nutzung bei Biomasse: Holz und Landflächen	Personen pro Haushalt sinkt auf 2,2 (2050) Wohnnutzfläche steigt auf 420 Mio. m^2 (2050)

Auch Christian et al. (2011) untersuchten in einer Studie mit dem Titel „Zukunftsfähige Energieversorgung für Österreich“, ob das österreichische Energiesystem ausschließlich auf der Basis erneuerbarer Energiequellen funktionieren könnte. Die Studie untersuchte die Potenziale erneuerbarer Energieträger und führt detaillierte „bottom up“ Modellierungen der Energienachfrage durch. Auf der Nachfrageseite berücksichtigt die Studie auch induzierte Effekte eines Strukturwandels. Wesentliche Eckpunkte sind in Tabelle 6.1, Ergebnisse in Tabelle 6.4. a und b zusammengefasst. Neben einem Referenzszenario entwarf die Studie zwei Szenarien mit zusätzlichen Maßnahmen: (1) „pragmatisch“ und (2) „forciert“. Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass bis zum Jahr 2050 die Endenergienachfrage von Privathaushalten im Vergleich zur Nachfrage 2005 um 46–73 % reduziert werden könnte, die des Dienstleistungssektors um 25–65 %, die aus dem produzierenden

Gewerbe (Industrie) um 10–14 % sowie die für Mobilität um 50–75 %.

Insgesamt kommt die Studie zum Schluss, dass die Energienachfrage bis 2050 um 33 bzw. 56 %, reduziert werden kann. Während deutliche Ähnlichkeiten hinsichtlich der Ausrichtung der Studie von Streicher et al. (2010) bestehen, ist diese Untersuchung optimistischer bezüglich der Frage welchen Beitrag erneuerbare Energieträger leisten könnten. Im pragmatischen Szenario könnte bereits nahezu die gesamte Energienachfrage Österreichs durch erneuerbare Energieträger gedeckt werden, in dem Szenario „Forciert" könnte darüber hinaus genug Energie durch erneuerbare Quellen erzeugt werden um sogar Überschüsse für den Export zu produzieren.

Auch Bliem et al. (2011) zeigen in ihrer Studie „Energy [R] evolution 2050 – Der Weg zu einer sauberen Energie-Zukunft für Österreich" klimafreundliche Entwicklungspfade bis 2050 auf, die zum überwiegenden Teil auf erneuerbaren Quellen beruhen (siehe Tabelle 6.5). Ihre Untersuchung beginnt mit einer detaillierten Beschreibung des aktuellen Energiesystems, basierend auf Voruntersuchungen von Energieangebot und -nachfrage von Haas et al. (2008) und Renner et al. (2010). Die Untersuchung identifiziert – im Vergleich zur Nachfrage 2010 – Einsparungsmöglichkeiten im Haushaltsbereich um 60 %, im Dienstleistungssektor um 28 %, in der Industrieproduktion im Ausmaß von 33 % und bei der Mobilität gar um 65 %. Insgesamt wird eine Reduktion der Endenergienachfrage im Bereich von 50 % bis 2050 (auf 543 PJ) für möglich gehalten, diese zu erreichen erfordert allerdings verbindliche regulatorische Ziele. Die Studie geht, im Gegensatz zu den beiden vorangehenden Arbeiten, auf übergeordnete und sektorspezifische Maßnahmen ein, z. B. Regulierung der Kohlenstoffemissionen, Förderung erneuerbarer Energiequellen, Steigerung der Energieeffizienz, ökologische Steuerreform, Ausweitung des Handels mit Emissionszertifikaten und vor allem geht sie auch auf Bemühungen um eine ressourceneffiziente Raumordnung ein. Außerdem wird in einem Anhang auf positiven Begleitnutzen der Transformation, wie z. B. positive Beschäftigungseffekte durch verstärkte Gebäudesanierung, eingegangen.

Auch diese Studie ist bezüglich der Potenziale für Energie aus erneuerbaren Quellen durchaus optimistisch und sieht Potenziale von insgesamt über 700 PJ bis 2050.

Lokal variiert die Verfügbarkeit erneuerbarer Potenziale allerdings erheblich (Stanzer et al., 2010) und regionalisierte, systematisch vergleichbare Bewertungen dieser Potenziale gehen bisher nicht über das Jahr 2020 hinaus. Szenarien zur Kostenentwicklung dieser Technologien, unter verschiedenen Förderbedingungen und Tarifstrukturen, würden Planungsaufgaben erleichtern. Solche Studien sollten auch die Anforderung erneuerbarer Technologien an die Netzstruktur, potentielle Nutzungskonflikte und Nachhaltigkeitsgrenzen beachten.

Auch Verbesserungen in der räumlichen und zeitlichen Analyse des aktuellen Energieverbrauchs (quantitative-, qualitative- und zeitliche Nachfragemuster) sind nötig, um Potenziale zur Systemintegration und weiterer Einsparungspotenziale besser identifizieren zu können. Darüber hinaus sind Infrastrukturdaten in besserer räumlicher Auflösung für die Ausarbeitung von langfristigen Szenarien der Klimawandelfolgen in Österreich (Strauss et al., 2010) und zur Planung von Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel notwendig. Wesentliche Herausforderungen sind dabei im Bereich des Landwirtschaftsektors und des Tourismus zu erwarten (siehe Band 3, Kapitel 4 und Strauss, 2012).

Abschließend kann zu den Energiemodellen, mit denen die hier vorgestellten Szenario-Analysen durchgeführt wurden, gesagt werden, dass sie den Optionen zur Änderung der Energiebereitstellung mehr Aufmerksamkeit widmen, während eine wesentliche Herausforderung bestehen bleibt, nämlich die Analyse der Nachfrage und des Energieverbrauchs. Diese zu untersuchen würde es erfordern, eine ungleich größere Anzahl an Details bezüglich Technologien und AkteurInnen sowie institutionellen Arrangements zu berücksichtigen, sowie die Treiber der steigenden Energienachfrage zu analysieren. Solche Untersuchungen wären nötig, um die wesentlichen AkteurInnen, Maßnahmen, Barrieren, Risiken und Kosten der Transformation zu beschreiben. Weil mit dem Umbau zur Klimaverträglichkeit keineswegs nur Belastungen verbunden sind, sondern dabei auch bedeutende Wachstumsbranchen gegründet werden, besteht öffentliches und volkswirtschaftliches Interesse daran, die neu entstehenden Möglichkeiten und zu erwartenden Umverteilungsprozesse darzustellen. Dies ist auch erforderlich, um effektiv wirkende Märkte gestalten zu können und nicht zuletzt Handlungsspielräume zur internationalen Verhandlung des globalen 2 °C Ziels zu identifizieren.

Um innerhalb der oben skizzierten Szenarien alternative Pfade zur Transformation in eine klimafreundliche und nachhaltige Gesellschaft zu erörtern, ist es außerdem erforderlich, die Auswirkung von globalen und regionalen Entwicklungsdynamiken zu berücksichtigen, die den weiteren Kontext für Entwicklungsoptionen in Österreich bilden und die in jenen Modellen nur unvollständig berücksichtigt werden. Bevor Handlungsmöglichkeiten einzelner AkteurInnen angesprochen werden, ist es im Sinne eines holistischen Ansatzes auch nötig, die Implikation der jeweils gewählten Bilanzrahmen der Klimaverantwortung zu spezifizieren, weil diese maßgeblich

definieren, was als Handlungsspielraum und -wirkung der Klimaschutzmaßnahmen sichtbar wird.

Als kleine, diversifizierte und wirtschaftlich offene Volkswirtschaft ist Österreich einer Vielzahl von internen und externen Dynamiken ausgesetzt, die bisher nur unvollständig als treibende Faktoren in Energie- und Emissionsmodellen abgebildet werden. Ein Beispiel dafür ist die rasch fortschreitende europäische und globale Marktintegration und Globalisierung, die bewirken, dass Prozessketten der verarbeitenden Industrien internationalisiert und komplexer werden, sowie die räumlichen Distanzen zwischen den Orten der Produktion und des Konsums von Gütern weiter zunehmen. Muñoz und Steininger (2010) zeigen beispielsweise, dass im Fall von Österreich bei der Produktion von Importgütern im Ausland mehr Emissionen anfallen als im Inland zur Produktion von Exporten entstehen (vgl. Band 3, Kapitel 5). Der österreichische Konsum induziert demnach im Ausland („upstream" im Terminus von Lebenszyklusanalysen) netto etwa 38–44 % mehr Emissionen, als in den territorial und produktionsseitig orientierten UNFCCC-Bilanzrahmen für Österreich ausgewiesen sind, wobei dieser Trend zunimmt. Diese „grauen" Emissionen werden stattdessen der Klimaverantwortlichkeit der Erzeugerländer zugerechnet, um Doppelzählungen auf der globalen Ebene zu vermeiden. Soweit diese Ursprungsländer der energie- und treibhausgasintensiven Produkte nicht im Rahmen von internationalen Verträgen zur Emissionsreduktion eingebunden sind, wird von „carbon leakage", also dem „einsickern" von emissionsintensiven Gütern in einen regulierten Markt gesprochen, was die Effizienz der Klimaschutzvereinbarungen unterwandert. Klimaschutzmaßnahmen müssen solche Zusammenhänge berücksichtigen, weil zu eng definierte Bilanzrahmen eine weitere Auslagerung von Emissionen anregen können und daher ihre Aufgabe, eine globale Reduktion von THG zu erreichen, verfehlen würden. Je räumlich detaillierter THG-Protokolle für offene ökonomische Systeme werden, etwa auf Ebene von Städten oder Gemeinden, desto bedeutender werden die potentiellen Verzerrungen die durch Vernachlässigung der im Güterhandel enthaltenen „grauen" Emissionen entstehen. Im konkreten sollte die Kohlenstoffbilanzierung nach Produktionslogik durch Kohlenstoffbilanzierung nach Konsumlogik ergänzt (nicht ersetzt) werden; in der Zusammenschau der beiden Ansätze entsteht ein klareres Bild der Hebelpunkte für Klimapolitik (Ahmad and Wyckoff, 2003; Nakano et al., 2009; Steininger et al., 2014).

Bei den meisten Energiemodellen (wie etwa MARKAL/TIMES, MESSAGE, oder REMIND, vgl. Kriegler et al., 2014) werden die THG-Emissionen und ihre weiteren Umweltauswirkungen direkt am Entstehungsort bilanziert. Das heißt, dass Verbrennungs- und Prozessbedingte Emissionen direkt am Ort der Produktion erfasst werden. Konsumorientierte Modelle, die methodisch meist auf mit Energie- und Emissionsbilanzen verknüpften ökonomischen Input-Output-Modellen basieren und oft in Form von angewandten Gleichgewichtsmodellen weiterentwickelt werden (Computable General Equilibrium, CGE), erfassen konzeptionell hingegen Emissionen der Prozesskette, und erlauben somit eine Bilanzierung der Emissionen für unterschiedliche Güter. Dieser Ansatz erlaubt somit auch die Quantifizierung der Emissionsauswirkungen von Handelsströmen inklusive der in den Vorleistungsketten von Konsumgütern anfallenden Emissionen (OECD, 2013). Dieser Ansatz ist näher an der Idee von Lebenszyklusstudien orientiert, die einem holistischen Ansatz folgen und ausgehend von funktionellen Kriterien sowohl „upstream" als auch „downstream" „von der Wiege bis zur Bahre" (bzw. inklusive zwischengeschalteter Recyclingkreisläufe „cradle to cradle") die gesamte Nutzung von Energie und Ressourcen für ein Produkt oder eine Dienstleistung bilanzieren, egal an welchem Ort dieser Welt sie stattfinden (siehe Abbildung 6.6). Ein Nachteil von CGE-Modellen ist hingegen ihre relative geringe technologische Auflösung, wodurch eine Abbildung des langfristigen Strukturwandels nur begrenzt möglich ist. Im Sinne der zwischen ErzeugerInnen und VerbraucherInnen zu teilenden Emissionsverantwortung sind diese unterschiedlichen Modellansätze komplementäre, einander ergänzende Betrachtungen.

Eng verbunden mit Entwicklungen der Industrieproduktion und der Globalisierung des Handels ist der Transportsektor. Internationale Transportemissionen (z. B. durch Frachtschiffe und internationalen Luftverkehr) sind Bestandteile der oben erwähnten „grauen Emissionen". Da sie vorwiegend auf internationalem Gebiet (z. B. auf hoher See) anfallen, werden sie keiner Nation direkt zugeordnet. Sie verdoppelten sich auf globaler Ebene zwischen 1990 und 2010 nahezu und umfassten 2010 etwa 1 100 Mt CO_2, was 4 % der CO_2-Emissionen aus fossilen Energiequellen entspricht. In einer Rangfolge nationaler Emissionsmengen wäre das der 6. Platz, etwas weniger als die Emissionen Japans (1 143 Mt CO_2), aber mehr als jene Deutschlands (762 Mt, vgl. International Energy Agency, 2012). Die Emissionen aus internationalen Bunkertreibstoffen werden laut UNFCCC Richtlinien zwar erfasst, sie sind aber bisher keinen Reduktionszielen unterworfen. Die EU befindet sich zwar mit ihren internationalen Haupthandelspartnern in Gesprächen mit dem Ziel diese Emissionen zu regulieren, aber die Diskussionen verlaufen zäh und eine Einigung dazu scheint nicht in Sicht. In Österreich stieg z. B. die Verkehrsleistung der Flughäfen von 7,7 Mio. PassagierInnen und 80 000 t

Tabelle 6.3 Zentrale Ergebnisse in Streicher et al. (2010)
Table 6.3 Key results Streicher et al. (2010)

Beantwortung der Fragestellung	Erneuerbare Energieträger	Basisjahr (2008)	Konstantszenario (2050)	Wachstumsszenario (2050)	Endenergieträger	Basisjahr (2008)	Konstantszenario (2050)
						Mobilität	
Energieautarkie für Ö 2050 ist machbar, wenn unter den Technologieannahmen die Nachfrage nach Energie-DL höchstens im angenommenen Ausmaß wächst. Der Spielraum zur 100 %igen Versorgung aus erneuerbaren Energieträgern ist gering (d. h. Bedarf an Energiedienstleistungen darf max. 0,8 % p.a. steigen, sonst muss Effizienz stärker erhöht werden).	Energiebereitstellung in PJ / a bzw. TWh / a					Endenergiebedarf in PJ / a (Veränderung 2008–2050 in %)	
	Biomasse	216 PJ	244 PJ	293	Elektrizität	7	30
	Wasserkraft	38 TWh	45 TWh	ca. 50 TWh	für Heizen und WW	.	.
	Windkraft	?	13 TWh (> 5x)	> 14 TWh	für Kühlen u. E-Geräte	.	.
	Photovoltaik	?	16 TWh (> 5x)	ca. 20 TWh	für WP (Wärme)	.	.
	Solarthermie	?	(> 10x)	75 PJ	Umgebungswärme (WP)	.	.
	Wärmepumpen (oberflächenn. Geoth.)	?	(> 8x)	68 PJ	Solarthermie	.	.
	Tiefe Geothermie	?	?	71 PJ	Biomasse und Wärmenetze	.	.
					Wärme HT elektrisch	.	.
					Wärme HT CH_4 aus CO_2	.	.
					Wärme HT Biomasse	.	.
					Wärme HT fossil	.	.
					Wärme NT (inkl. Beheizung)	.	.
					Kraftstoffe	288	38
					Erdöl	.	.
					(Erd-)Gas	10	17
					Insgesamt	ca. 300	ca. 90 (–70%)

Notwendig: Sehr hohe Effizienzsteigerungen, Absenken des derzeitigen Wachstums der Nachfrage nach Energiedienstleistungen, drastische Umstellung der Anwendungstechnologien.
Endenergiebedarf 2050 reduziert sich um > 50 % (KS) auf knapp 500 PJ bzw. knapp 40 % auf ca 640 PJ (WS).

Frachtumschlag im Jahr 1990 auf 24,5 Mio. PassagierInnen und 246 000 t Fracht im Jahr 2010 (ÖSTAT, 2011). Die sich daraus ergebenden Emissionen sind in nationalen Emissionsszenarien oder Klimaschutzstrategien oft nur teilweise oder gar nicht berücksichtigt. Umfassende Strategien zur Transformation in eine klimafreundliche Gesellschaft müssen allerdings auch diese Herausforderung adressieren.

Auch der wachsende internationale Güterverkehr auf den Straßen stellt nach wie vor erhebliche Herausforderungen an die Bilanzierung der Emissionsverantwortung und an die Diskussion über möglicherweise effektive Regulierungsmechanismen. Wie in Band 3, Kapitel 3 und Band 2, Kapitel 1 berichtet, bestehen erhebliche Diskrepanzen zwischen den im Inland verkauften Kraftstoffmengen und dem anhand von Verkehrszählungen und Aktivitätsmodellen berechneten Kraftstoffverbrauch des Transports auf Österreichs Straßen. So wurden im Jahr 2003 schätzungsweise 28 % des in Österreich verkauften Kraftstoffs nicht auf inländischen Straßen verfahren (BMLFUW, 2007), allerdings muss hier angemerkt werden, dass diese Schätzungen beträchtliche Unsicherheiten aufweisen. Die Emissionsverantwortung dieser Fahrten fällt gemäß dem UNFCCC-Bilanzrahmen an dem Ort des Kraftstoffhandels, Österreich an und sie waren damit ein wesentlicher Grund für die Emissionszunahmen im Transportsektor seit 1990.

Vielfach wird für diesen Vorgang der Begriff des „Tanktourismus“ verwendet (richtig wäre „Kraftstoffexport im Tank“),

Wachstums-szenario (2050)	Basisjahr (2008)	Konstant-szenario (2050)	Wachstums-szenario (2050)	Basisjahr (2008)	Konstant-szenario (2050)	Wachstums-szenario (2050)	Basisjahr (2008)	Konstant-szenario (2050)	Wachstums-szenario (2050)
Mobilität	Gebäude			Industrie			Insgesamt		
Endenergiebedarf in PJ/a (Veränderung 2008–2050 in %)									
43	96	73	89	99	59	89	ca. 200	↓ca. 190	↑ca. 250
.	27	0	0	.	.	.			
.	69	57	66	.	.	.			
.	wenig	16	23	.	.	.			
.	wenig	49	68	.	.	.			
.	wenig	49	69	.	.	.			
.	157	39	13	.	.	.			
.	.	.	.	0	25	25			
.	.	.	.	0	22	46			
.	.	.	.	7	38	58	ca. 120	↓↓ca. 40	↓↓ca. 40
.	.	.	.	123	0	0			
.	.	.	.	65	57	86	ca. 220	↓ca. 190	→ca. 220
40	.	.	.	18	0	0	ca. 380	↓↓↓ca. 40	↓↓↓ca. 40
.	82	0	0						
15	86	0	0				ca. 90	↓↓ca. 40	↓↓ca. 50
(−2/3)	ca. 430	ca. 210	ca. 240	ca. 300	ca. 195 (−35 %)	ca. 295 (−2,3 %)	ca. 1100	ca. 500 (−53 %)	ca. 650 (−38 %)

der nahelegt dass dieser Effekt weitgehend extern induziert wäre, z. B. hervorgerufen durch die hohe Zahl an TransitfahrerInnen, die in Österreich tanken. Dieses Verhalten würde wegen der in Österreich im EU-Vergleich besonders niedrigen Mineralölsteuer auch naheliegen. Die durch preisinduzierten Kraftstoffimport im Tank jährlich lukrierten Einnahmen an Mineralölsteuern liegen in einer ähnlichen Größenordnung wie die innerhalb der gesamten ersten Kyoto-Periode von Österreich nötigen Zukäufe an international gehandelten Emissionszertifikaten (500–600 Mio. €). Hier bestehen also fiskalpolitische Interessen, die österreichischen Klimaschutzzielen entgegenwirken. Die leichten Erhöhungen der Mineralölsteuer 2007 um 0,03 €/l bei Benzin und 0,05 €/l bei Diesel, sowie im Jänner 2011 von 0,04 €/l für Benzin und 0,05 €/l für Diesel reichten nicht aus, um in diesem Bereich eine wesentliche lenkende Verhaltensänderung herbeizuführen und es bestehen nach wie vor erhebliche Preisdifferenzen (–0,24 €/l Benzin, –0,05 €/l Diesel im Vergleich zu Deutschland, –0,30 €/l Benzin, –0,31 €/l Diesel im Vergleich zu Italien (ARBÖ, 2013).

Darüber hinaus herrscht noch Unklarheit über den genauen Beitrag ausländischer Fahrzeuge an den Mineralölkäufen (BMLFUW, 2004; International Energy Agency and Organisation for Economic Co-operation and Development, 2008). So nahm insgesamt das Außenhandelsvolumen (Importe und Exporte) Österreichs seit 1990, nicht zuletzt als Folge des EU-

Tabelle 6.4a Zentrale Ergebnisse Christian et al. (2011)
Table 6.4a Key results Christian et al. (2011)

Beantwortung der Fragestellung	Energieträger	Basisjahr (2005)	Szenario Pragmatisch			Szenario Forciert	
			2020	2050**	2050 Importe fossil	2020	2050
		Energiebereitstellung in PJ/a (Bruttoinlandsverbrauch)*					
Im Szenario Forciert 2050 ist Autarkie prinzipiell möglich, es bleibt aber ein „Winterloch", das mit besserer Speichertechnik u/o Importe ausgegliche werden muss. Szenario Pragmatisch: evtl. 20 bis 30 Jahre später.	Öl	573	305	0	85	214	0
	Kohle	166	135	0	91	133	0
	Gas	326	305	0	16	259	0
	Biogas	1	90	290	220	90	186
	Biomasse fest	151	161	295	185	146	212
	Biomasse flüssig	2	38	30	10	25	0
	Strom	56	15	−24	−28	6	−50
	Wasserkraft	129	144	152	152	144	152
	Windkraft	5	26	61	61	26	61
	Photovoltaik	0	9	95	95	9	95
	Geothermie	0	0	8	8	0	8
	industrielle Abwärme	0	4	6	6	4	6
	Solarthermie	5	27	32	32	23	18
	Wärmepumpen	5	25	28	28	22	20
	Insgesamt	1 419	1 283	973	959	1 100	706

* Auch Angaben zu Aufbringung, Importen, Exporten
** Importalternative für Biogas und Biomasse (sehr hoch)

Beitritts 1995, um rund 200 % zu (von etwa 100 Mrd. US$ 1990 auf 352 Mrd. US$ im Jahr 2011). Heimische Frächter legen in Folge auch deutlich größere Strecken im Ausland zurück, ohne notwendigerweise dort tanken zu müssen, da moderne Lastkraftwagen über eine Autonomie weit über 1 000 km verfügen. Im Ausland zu tanken wäre wegen der deutlich niedrigeren österreichischen Mineralölsteuer auch unökonomisch. Sollten diese Fahrten tatsächlich einen relevanten Anteil am Kraftstoffexport im Tank haben, wäre es unwahrscheinlich dass die damit verbundenen Emissionen sich durch eine Erhöhung der Mineralölsteuer reduzieren lassen. Diese Maßnahme wird in der nationalen Klimaschutzstrategie aber nach wie vor als wesentliche Handlungsoption im Verkehrssektor dargestellt.

Auch das individuelle Mobilitätsverhalten innerhalb von Österreich ändert sich zunehmend in Richtung häufigere und längere Wegstrecken im Alltag. Während aus strukturschwachen Regionen wie dem Waldviertel oder inneralpinen Raum nach wie vor Bevölkerung abwandert, findet insbesondere in Ballungsräumen und im Umland der Großstädte eine unregulierte und kaum an öffentlichen Nahverkehr angebundene Suburbanisierung statt.

Entsprechend wächst im österreichischen Durchschnitt insbesondere der PKW-Verkehr. So nahm die Zahl der PKWs seit 1990 um 53 % zu, auf etwa 4,6 Mio. im Jahr 2012. Potentiell bedeutende Entwicklungen in der Informationstechnologie wie „online shopping" oder virtueller Behördenzugang via Internet, die das Potenzial hätten, Wege einzusparen, haben diesen Trend zu höherem Mobilitätsbedarf bisher nicht ändern können. Insbesondere im Bereich der Telearbeit, wo Erwerbstätige teilweise vom Wohnort ihre Arbeit verrichten und auf diese Weise Pendlerfahrten vermeiden, scheinen erhebliche institutionelle Barrieren entgegenzustehen, die einer effektiven Nutzung des klimaschonenden Potenzials dieser Technologie entgegenwirken. Mobilitätsvermeidung durch Verbesserungen des Zugangs zu Tätigkeiten und Handlungsmöglichkeiten vor Ort sollte Priorität haben und Angebote hochqualitativen öffentlichen Nahverkehrs, sowie nichtmotorisierte Erreichbarkeit in Ballungsräumen müssen dies ergänzen.

Tabelle 6.4b Zentrale Ergebnisse Christian et al. (2011)
Table 6.4b Key results Christian et al. (2011)

	Sektor*														
	Mobilität					Private Haushalte					Dienstleistungsbereich				
Nutzenergiekategorie	Basisjahr (2005)	Szenario Pragmatisch		Szenario Forciert		Basisjahr (2005)	Szenario Pragmatisch		Szenario Forciert		Basisjahr (2005)	Szenario Pragmatisch		Szenario Forciert	
		2020	2050	2020	2050		2020	2050	2020	2050		2020	2050	2020	2050
	Endenergiebedarf in PJ/a														
Traktion	341	287	170	190	69	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Raumwärme	0	0	0	0	0	199	156	88	128	27	84	77	48	66	17
Beleuchtung	0	0	0	0	0	7	6	6	4	2	14	8	6	6	4
Elektrochemische Zwecke	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dampferzeugung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	3	3
Industrieöfen (inkl. Warmwasser)	0	0	0	0	0	39	39	32	32	23	22	23	23	19	16
Standmotoren	0	0	0	0	0	28	21	21	14	10	13	16	20	10	8
Insgesamt	341	287	170	190	69	273	222	147	177	62	136	127	102	104	47

	Sektor*														
	Sachgüterproduktion					Landwirtschaft					Insgesamt				
Nutzenergiekategorie	Basisjahr (2005)	Szenario Pragmatisch		Szenario Forciert		Basisjahr (2005)	Szenario Pragmatisch		Szenario Forciert		Basisjahr (2005)	Szenario Pragmatisch		Szenario Forciert	
		2020	2050	2020	2050		2020	2050	2020	2050		2020	2050	2020	2050
	Endenergiebedarf in PJ/a														
Traktion	0	0	0	0	0	10	10	10	10	10	351	297	180	200	79
Raumwärme	26	26	26	25	24	9	9	9	9	9	318	268	170	227	77
Beleuchtung	11	4	2	3	2	1	1	1	1	1	33	18	16	13	9
Elektrochemische Zwecke	2	2	2	2	1	0	0	0	0	0	2	2	2	2	1
Dampferzeugung	75	72	71	70	69	0	0	0	0	0	79	76	76	74	72
Industrieöfen (inkl. Warmwasser)	86	82	80	79	74	2	2	2	2	2	149	147	137	132	115
Standmotoren	112	108	100	105	98	3	3	3	3	3	155	147	144	131	118
Insgesamt	311	294	280	284	268	24	24	24	24	24	1085	954	723	779	471

Das Verständnis von Änderungen der Bevölkerungs- und Haushaltsstrukturen, deren mögliche Lenkbarkeit durch Politikmaßnahmen und letztendliche Klimawirkung sind wesentliche Herausforderungen langfristiger Szenarien. So nimmt das Durchschnittsalter der österreichischen Bevölkerung nach wie vor kontinuierlich zu, während die Zahl an Personen pro Haushalt sinkt. Die UN-Projektionen für die Gesamtbevölkerung Österreichs bis 2100, einem Zeitpunkt zu dem viele Komponenten derzeit gebauter Infrastruktur noch existieren werden, zeigen z. B. eine Spannweite von 6,2 bis 14,2 Mio. EinwohnerInnen. In der zugegebener Weise unwahrscheinlichen UN-Szenarien-Variante „No change, constant fertility and mortality, zero migration" („kein Wandel, konstante Geburtenhäufigkeit und Sterbewahrscheinlichkeit, keine Migration)" sinkt die Bevölkerung bis 2100 gar auf 3,4 Mio. Für die Rentabilität und Effektivität von potentiell klimafreundlicher Infrastruktur wie Fernwärmenetze, Hochgeschwindigkeitszüge oder öffentlichem Nahverkehr ist die langfristige Auslastung bedeutend und insbesondere das Phänomen „schrumpfender Städte", die einen Rückbau existierender Infrastruktur in Zeiten sinkender Steuereinnahmen durchführen müssen, verdient daher größere Aufmerksamkeit.

Tabelle 6.5 Zentrale Ergebnisse Bliem et al. (2011)
Table 6.5 Key results Bliem et al. (2011)

						Sektor	
						Verkehr (exkl. Flug)*	
Beantwortung der Fragestellung	Erneuerbare Energieträger	Basis-jahr (2010)	2020	2050	Endenergieträger	Basisjahr (2010)	2020
Das vorhandene Potential an erneuerbaren Energieträgern reicht aus, um das Wirtschaftssystem nachhaltig zu gestalten. Drastische Einsparungen und Strukturbrüche sind aber notwendig.		Energiebereitstellung in PJ/a (POTENTIALE)				Endenergiebedarf in PJ/a (Veränderung 2008–2050 in %)	
	Wasserkraft	ca. 140	ca. 155	ca. 160	Umgebungswärme	.	.
	Photovoltaik	-	ca. 10	79	Biogene Brennstoffe	.	↑
	Windenergie	ca. 7	ca. 10	25	Fernwärme	.	.
	Solarthermie	ca. 5	ca. 10	ca. 50	Elektrische Energie	.	↑↑
	Wärmepumpen	ca. 5	ca. 20	ca. 40	Abfall	.	.
	Geothermie	sehr wenig	max. 5	ca. 20	Fossil-gasförmig	.	→
	Brennholz	ca. 65	ca. 80	ca. 100	Fossil-flüssig	.	↓
	Biogene Brenn- und Treibstoffe	ca. 140	ca. 150	ca. 200	Fossil-fest	.	.
	Brennbare Abfälle	ca. 28	ca. 35	ca. 40			
	Insgesamt (Schätzung)	390	475	714	Insgesamt	ca. 330	ca. 295
					Flugverkehr	ca. 28	ca. 32
					davon: Biogene Brennstoffe	0	geringer Anteil

Ergebnisse für 2050:
Energieverbrauch wird (entgegen aktueller Trends) sinken
Effizienterer Einsatz von Energie entlang der gesamten Wertschöpfungskette
Einführung neuer Technologien (z. B. Elektrifizierung des Verkehrs)
Optimale Ausschöpfung der Energieeffizeinzpotentiale notwendig
Gesamter Bedarf an Elektrizität und Fernwärme aus EET

Im Bereich der Sozialversicherungs- und Familienpolitik werden vielfältige Maßnahmen diskutiert um den allgemeinen Herausforderungen demografischen Wandels zu begegnen. Deren Implikation auf zukünftigen Energiebedarf und THG-Emissionen wird in bisherigen Modellen allerdings selten hergestellt.

6.3.2 AkteurInnen

Haushalte

In diesem Abschnitt werden drei Studien vorgestellt, die sich wesentlich mit der Bedeutung von Haushalten als mögliche Akteure im Klimaschutz beschäftigen. Darunter sind zwei Studien, bei denen das WIFO maßgeblich beteiligt war, sowie eine Untersuchung, die vom SERI geleitet wurde, die unter anderem die sozialen Verteilungseffekte von klimapolitischen Maßnahmen adressiert.

Lebensstile können als empirische Umsetzungen der Wertvorstellungen und Präferenzen eines Haushalts beschrieben werden. Neben der rein ökonomischen Wirkung (z. B. die Veränderung der Konsumausgaben, der Rolle des und die Wirkung auf das verfügbare Einkommen und Vermögen) oder ihrer sozialen Wirkung können Lebensstile auch hinsichtlich ihrer Umweltwirkung analysiert werden. Das WIFO untersuchte im Rahmen des vom BMWF geförderten „ProVision“ Programms die von Statistik Austria erhobenen Konsumdaten, um die Auswirkung von Haushaltsentscheidungen auf globale CO_2-Emissionen zu ermitteln. Auf dieser Grundlage wurden außerdem Abschätzungen der möglicherweise durch Verhaltensänderungen erzielbaren Emissionsminderungen getroffen.

Sektor															
Verkehr (exkl. Flug)*	Private Haushalte**			Dienstleistungen**			Produzierender Bereich***			Landwirtschaft			Insgesamt (Schätzung)		
2050	Basisjahr (2010)	2020	2050	Basisjahr (2010)	2020	2050	Basisjahr (2010)	2020	2050	Basisjahr (2010)	2020	2050	Basisjahr (2010)	2020	2050
Endenergiebedarf in PJ/a (Veränderung 2008–2050 in %)															
.	.	↑↑	↑	.	↑	↑	.	.	.	.	↑	↑	.	↑	↑
↓↓	.	↓	↓↓	.	↑	↑	.	↑	↑↑	.	↑	↑	.	↑	→
.	.	↓	↓↓	.	↓	↓↓	.	↑	↑	.	→	↑	.	↓	↓
↑↑↑	.	→	→	.	→	↓	.	↓	↓	.	→	↓	.	→	↑
.	.	?	?	.	→	↑	.	↓	↓	.	.	.	.	→	→
→	.	→	→	.	→	↓↓	.	↓↓	↓↓	.	→	0	.	↓	↓
↓↓ ↓	.	↓	0	.	↓	0	.	↓↓	↓↓	.	↓	↓	.	↓	↓↓
.	.	↓	0	.	→	→	.	↓	↓↓	.	.	.	.	↓	↓
ca. 105	ca. 260	ca. 240	105	ca. 108	ca. 105	< 80	ca. 309	ca. 254	207	22	ca. 22	21	1 057	947	543
ca. 25															
23															

Restbestand fossiler ET in Industrie (v. a. Stahl, Aluminium, Zement)

- ab 2020 deutliche Entkoppelung von Wirtschaftswachstum und Energieverbrauch
- Endenergieverbrauch Österreichs von 1 060 PJ (2010) auf 540 PJ (2050)

Auch Entwicklung der CO_2-Emissionen bis 2050 dargestellt!!

- mehr als 90 % der CO_2-Emissionen können im Vergleich zu 2008 eingespart werden (auf 6,4 Mio. t)

* lt. Prognose und Öko-Institut e.V.
** lt. Steering Szenario
*** lt. Prognose und Öko-Institut e.V. sowie Prognose, EWI und GWS

Dazu wurde ein erweitertes Input-Output-Modell verwendet, das monetäre Zeitreihendaten über den privaten Konsum nutzt und diese mit Energieverbrauch und THG-Emissionen in Verbindung setzt. Die Summe der vorherrschenden Konsummuster bildet (gemeinsam mit öffentlichem Konsum, Bruttoinvestition und Güterausfuhr) einen wesentlichen Bestandteil der (monetären) Endnachfrage. Sie kann als kausaler Verursacher aller Vorleistungsverflechtungen in der Industrieproduktion und des gesamten Vertriebs und Handels angesehen werden. Die so abgebildete Emissionsverantwortung des Haushaltssektors ist wesentlich umfassender als in den im vorigen Abschnitt diskutierten Energiemodellen (wo als Emission von Haushalten vorwiegend nur der direkte Energieverbrauch in Wohngebäuden abgebildet wurde). Hier werden etwa die Vorleistungen aller Güter und Dienstleistungen berücksichtigt, die Haushalte konsumieren, so z. B. auch die von Privathaushalten an Tankstellen bezogenen Kraftstoffe oder allgemeine Dienstleistungen wie z. B. heimisch nachgefragter Tourismus. Das Input-Output-Modell ermöglicht außerdem nicht nur die direkten, in Österreich anfallenden CO_2-Emissionen abzuschätzen, sondern auch – soweit die schwierig zu erhaltende Kohlenstoffintensität der Importe nach Herkunftsland bekannt ist – entlang der gesamten Wertschöpfungskette (dem Lebenszyklus der Produkte und Dienstleistungen folgend), jene indirekten „grauen", durch Konsum von aus dem Ausland importierten Vorleistungen und Produkten induzierten Emissionen annähernd zu quantifizieren. Dabei kann man jedoch eine Einheit „importierter" Emissionen (also: eingebettet in eingeführte Güter) nicht einfach mit einem Ausstoß einer Einheit von Emissionen in die Atmosphäre gleichsetzen (Peters und Hertwich, 2008; Lindner et al., 2013; Jakob et al., 2014; Steininger et al., 2014).

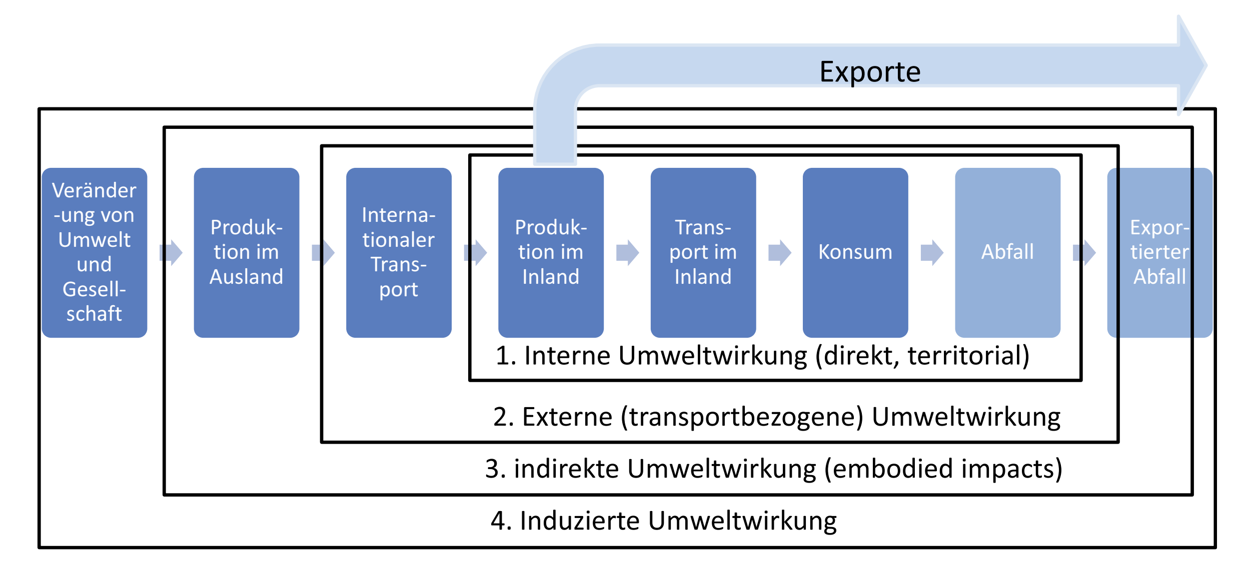


Abbildung 6.6 Einbettung der territorial- und produktionsseitigen Bilanzierung nach UNFCCC (1), die sich auf direkte Emissionsverantwortung konzentriert, bzw. in alternative, anhand von Lebenszyklusanalysen definierte Bilanzrahmen (2–4), die ergänzend auch indirekte, konsumbezogene Emissionsverantwortungen berücksichtigen; Quelle: Modifiziert nach WWF UK (2006)

Figure 6.6 Contextualization of the territorial and production oriented scope definition of UNFCCC (1) which focuses on responsibility for direct emissions, or with alternative definitions (2–4) which include indirect, consumption oriented scope definitions; Source: modified from WWF UK (2006)

Das Haushaltsmodell verwendet als wesentliche Faktoren für die Nachfragestruktur vorherrschende Haushaltsausgaben, Preisinformationen, Einkommen und andere sozioökonomische Komponenten. Lebensstile und Konsumpräferenzen wurden in dem ProVision Projekt mit statistischen Methoden durch den Ausschluss des Beitrags anderer Variablen als Residualwert ermittelt.

Die Analyse zeigt, dass zusätzlich zu den durch den Konsum privater Haushalte im Inland direkt verursachten Emissionen von jährlich 19,6 Mt CO_2 (z. B. Raumwärmebereitstellung, Nutzung von Privatautos) weitere 16,7 Mt durch die private Nachfrage von inländische Industriegütern verursacht wird, sowie 17,4 Mt im Ausland aufgrund der von Privathaushalten nachgefragten Importe. Insgesamt umfasst die Emissionsverantwortung der Haushalte etwa 70 % der in der nationalen THG-Bilanz Österreichs beschrieben Gesamtemissionen (siehe Tabelle 6.6).

Im Rahmen dieser Studie wurde auch versucht abzuschätzen, in welcher Größenordnung Verhaltensänderungen des Haushaltssektors zu ambitionierten THG-Reduktionen beitragen könnten. Durch statistische Abgleichmethoden wurden die Einflüsse der Haushaltspräferenzen von anderen Faktoren getrennt. Haushalte konnten dann anhand ihres Energieverbrauchs unterschiedlich nachhaltigen Gruppen zugeordnet werden. Diese Gruppen unterschieden sich trotz ähnlicher Haushaltscharakteristik (Größe, Einkommensstruktur, geographische Lage etc.) im Lebensstil: Sie gaben etwa deutlich weniger Einkommen für Benzin / Diesel, Elektrizität, Heizung, etc. aus. Das Gesamtpotenzial der durch Verhaltensänderungen erzielbaren Emissionsreduktionen könnte durch eine hypothetische komplette Verschiebung der Verhaltensmuster in die Gruppe mit stark ausgeprägtem nachhaltigem Verhalten abgeschätzt werden. Dieses Gedankenexperiment zeigt, dass erhebliche Reduktionen in der Energienachfrage und in den direkten Emissionen durch Haushalte in der Größenordnung von rund 6 Mt CO_2 möglich wären (Band 3, Kapitel 5). Die indirekten (induzierten) Emissionen durch Haushalte in der inländischen Industrieproduktion würden leicht sinken, während die im Ausland durch Haushaltskonsum induzierten Emissionen leicht steigen würden. Das Projekt untersuchte allerdings keine Maßnahmen oder Instrumente, um eine solche Verhaltensänderung tatsächlich umzusetzen, und kombinierte die erzielten Einsichten auch nicht mit einem konkreten Szenario der technischen Klimastabilisierung (siehe Tabelle 6.7).

Auch die Publikation „Energieszenarien 2030“ (Kratena und Meyer, 2011) untersuchte unter anderem die Handlungsmöglichkeiten von Haushalten zum Klimaschutz. Die darin vorgestellten Szenarien bilden die Grundlage für THG-Szenarien des Umweltbundesamtes und werden sowohl im „Monitoring Mechanism 2011“ als auch in Berichten im Zuge des UNFCCC und für die Österreichische Klimastrategie 2020 verwendet.

Tabelle 6.6 Durch Konsum von österreichischen Haushalten induzierte CO_2-Emissionen (1 000 Tonnen); Quelle: Kratena et al. (2009)
Table 6.6 CO_2-emissions induced by consumption of Austrian households (1 000s of tons); Source: Kratena et al. (2009)

	2000	2001	2002	2003	2004	2005
a) Direkte CO_2 Emissionen, Haushalte	18 479	20 071	19 836	20 536	20 306	19 665
als % der Gesamtemissionen (direkt & indirekt) der Haushalte	38,6 %	47,8 %	48,2 %	46,9 %	46,4 %	36,6 %
b) Indirekte CO_2 Emissionen der Haushalte aus dem Konsum innländisch produzierter Güter & Dienstleistungen	15 185	16 529	15 780	16 602	16 591	16 683
als % der Gesamtemissionen (direkt & indirekt) der Haushalte	31,7 %	39,4 %	38,4 %	37,9 %	37,9 %	31,0 %
c) Indirekte CO_2 Emissionen der Haushalte aus dem Konsum importierter Güter & Dienstleistungen	14 272	5 360	5 508	6 676	6 835	17 420
als % der Gesamtemissionen (direkt & indirekt) der Haushalte	29,8 %	12,8 %	13,4 %	15,2 %	15,6 %	32,4 %
Gesamtemissionen der Haushalte (Summe a+b+c)	47 935	41 960	41 124	43 814	43 732	53 768
als % der nationalen, direkten CO_2 Emissionen (d)	73 %	62 %	60 %	60 %	60 %	71 %
d) Nationale direkte CO_2 Emissionen total (ohne indirekte Emissionen durch den Konsum von Importen/Exporten)	65 283	67 639	68 635	73 021	73 429	75 981

Die in dieser Studie erstellten Szenarien beinhalten: (i) ein Referenzszenario (mit Maßnahmen, MM), in dem Politikmaßnahmen und Klimaziele, die vor dem 2. Februar 2010 in Kraft traten, Berücksichtigung fanden, sowie (ii) ein Szenario von zusätzlichen klima- und energiepolitischen Maßnahmen (mit zusätzlichen Maßnahmen, MZM), das eine Reihe darüber hinausgehende Maßnahmen zur THG-Vermeidung berücksichtigt.

Relevante Umweltgesetzgebung, die bereits im Szenario (i) berücksichtigt wurde, beinhaltet die zahlreichen EU Direktiven, die bereits in nationalen Gesetzgebungen umgesetzt wurden. Darunter befindet sich: Umweltförderung Inland (UFI), der Klima und Energiefonds (kli:en), weitere nationale Programme (z. B. „klima:aktiv Mobilität"), sowie Programme auf Länderebene (z. B. finanzielle Anreize zur energetischen Biomassenutzung). Details dieser Maßnahmenbündel wurden bereits in früheren Kapiteln aufgelistet. Politikmaßnahmen im Haushaltssektor konzentrieren sich auf Verbesserungen der Energieeffizienz von Investitionsgütern (Gebäude, Heizsysteme, Fahrzeuge, elektrische Geräte). Insbesondere betrifft dies Gebäude, während im Bereich des Transports einige der Maßnahmen bereits Verhaltensänderungen berücksichtigen. Die vorgeschlagenen Politikmaßnahmen wurden dazu in Parameter übersetzt, die in den jeweils von Projektpartnern verwendeten Bottom-Up-Modellen umgesetzt wurden. Die aus den Modellen resultierenden Indikatoren zur Energieeffizienz wurden dann als Inputdaten in das Top-Down-Modell eingespeist. Dies war etwa der Fall für die parametrische Umsetzung der Energiedienstleistung Raumwärme. Die Bottom-Up- und Top-Down-Modelle wurden auch bezüglich der Investitionen in energieeffiziente Gebäudesanierung harmonisiert, sowie zur Ermittlung der notwendigen Förderungen, um die Energieeffizienz des Gebäudesektors zu verbessern. Die vorgeschlagenen Politikmaßnahmen in diesem Bereich des Energieverbrauchs der Haushalte umfassen:

- Entwicklung neuer Standards zur Beurteilung der Energieeffizienz von Gebäuden
- Wohnbauförderung, die entlang der neuen energetischen Gebäudestandards allokiert wird

Darüber hinaus wurden in den „Energieszenarien 2030" weitere technische und verhaltensändernde Maßnahmen im Transportsektor wie im Haushaltsbereich berücksichtigt. Technische Maßnahmen, die auf eine Verbesserung der Energieeffizienz der Privatfahrzeuge abzielen, beinhalten:

- Förderung von energieeffizienten Fahrzeugen und neuartiger Antriebstechniken
- Förderung von erneuerbaren Treibstoffen (Biokraftstoffe)

Tabelle 6.7 Änderungen der CO_2-Emissionen durch vollständige Nutzung des Potenzials von Lebensstiländerungen. Quelle: Kratena et al. (2009)

Table 6.7 Potential changes of CO_2-emissions due to life-style changes. Source: Kratena et al. (2009)

	2000	2001	2002	2003	2004	2005
a) Direkte CO_2 Emissionen, Haushalte	−5 897	−6 370	−6 369	−6 514	−6 571	−6 384
b) Indirekte CO_2 Emissionen der Haushalte aus dem Konsum inländisch produzierter Güter & Dienstleistungen	−163	−350	−176	−403	−411	−294
c) Indirekte CO_2 Emissionen der Haushalte aus dem Konsum importierter Güter & Dienstleistungen	332	22	38	−14	−10	241
	−5 727	−6 698	−6 507	−6 931	−6 992	−6 437
als % der nationalen, direkten CO_2 Emissionen (d)	−8,8 %	−9,9 %	−9,5 %	−9,5 %	−9,5 %	−8,5 %

Maßnahmen, die auf Änderungen im Mobilitätsverhalten abzielen:

- Förderung des öffentlichen Verkehrs
- Mobilitätsmanagement
- Verbesserte Raumplanung mit Berücksichtigung von Optionen der Transportvermeidung
- Ökologisierung von Steuern und Anreizsystemen

Insgesamt ist festzustellen, dass die in den „Energieszenarien 2030" entwickelten Transformationspfade zu einer Energie- und THG-Effizienten Wirtschaftsform weitgehend auf Änderungen der Investitionsgüter abzielen, soweit diese Maßnahmen mit den verwendeten Modellen abzubilden waren. Lediglich im Bereich privater Transport wurden Änderungen im Verhalten als Teil einer Klimastrategie in Erwägung gezogen, wobei aber nicht explizit beschrieben wurde, mit welchen Steuerungsinstrumenten diese Verhaltensänderung bewirkt werden könnte.

Um die Sensitivität des Energieverbrauchs auf Änderungen im Wirtschaftswachstum analysieren zu können, wurden beide Szenarien (MM und MZM) zusätzlich unter der Annahme eines geringeren Wirtschaftswachstums (1,5 %/Jahr anstelle von 2 %; MMsens und MZMsens) berechnet. Um für diese Sensitivitätsanalyse ein konstantes Szenario des wirtschaftlichen Umfelds von Österreich zu entwerfen wurde davon ausgegangen, dass das geringe BIP-Wachstum Österreichs durch geringeres globales Wachstum hervorgerufen wurde, was auch in geringeren globalen Energiepreisen bis 2030 resultiert.

Während sich die beiden gerade vorgestellten Arbeiten vorwiegend mit dem Beitrag, welchen Haushalte als Akteure zum Klimaschutz leisten können, befassten, untersuchte eine weitere Studie die ökonomischen Auswirkungen verschiedener Klimaschutzmaßnahmen auf die Haushaltseinkommen. Im Projekt KONSENS (KONSumentInnen und ENergie-Sparmaßnahmen: Modellierung von Auswirkungen energiepolitischer Maßnahmen auf KonsumentInnen, geleitet vom SERI, 2011), untersuchte das SERI gemeinsam mit GWS die Verteilungseffekte von Politikmaßnahmen, die zur Steigerung der Energieeffizienz und zu Klimaschutzmaßnahmen diskutiert werden (Besteuerung von CO_2, Handel von CO_2-Emissionszertifikaten privater Haushalte, Reform der Wohnbauförderung), unter Verwendung des integrierten umweltökonomischen Modells „e3.at" (Wolter et al., 2011). Um diese Analyse durchführen zu können wurde das Modell erweitert, um Haushaltstypen unterscheiden zu können.

Das Projekt KONSENS zielt darauf ab, Verteilungseffekte spezifischer energie- und klimapolitischer Maßnahmen zu untersuchen. Drei mögliche Politikmaßnahmen wurden zur Modellierung und Analyse ausgewählt: Die Einführung handelbarer CO_2-Emissionszertifikate für alle BürgerInnen (auch unter dem Begriff „Individueller Kohlenstoffhandel" oder „CO_2-Konto" diskutiert), die Einführung einer Besteuerung auf CO_2-Emissionen und eine Reform der gegenwärtigen Wohnbauförderung (um eine Änderung der Ausrichtung von der gegenwärtigen vorwiegenden Förderung von Neubauten in Richtung vermehrte Förderung von Renovierung, Erhaltung und energetischer Verbesserung des Gebäudebestands zu erreichen).

Im Projekt KONSENS wurde das Modell e3.at um ein sozioökonomisches Modul erweitert um 25 verschiedene Haushaltstypen, die sich hinsichtlich Haushaltsgröße und Einkommen unterschieden, abbilden zu können. Die Modellergebnisse zeigen, dass Haushalte in unterschiedlichem Ausmaß von den drei Maßnahmen betroffen waren. Das persönliche CO_2-Konto wirkt hauptsächlich auf Haushalte mit hohem Einkommen und mit wenigen Haushaltsmitgliedern. Eine deutlich positive Auswirkung auf CO_2-Emissionen ist nur möglich, wenn alle Haushalte die Möglichkeit haben Verhaltensänderungen durchzuführen, was nur bedingt der Fall ist.

Eine CO_2 Steuer würde große Haushalte mit geringen Einkommen überproportional betreffen; bereits jetzt geben diese große Anteile ihres verfügbaren Einkommens für das Heizen und andere Energieausgaben aus. Kleine Haushalte mit hohem Einkommen wären im Vergleich dazu weniger betroffen. Eine Verringerung der Sozialversicherungsbeiträge oder der Einkommenssteuer hätte keine deutlichen Vorteile für Haushalte geringen Einkommens oder für Haushalte die nicht am Erwerbsleben teilnehmen.

Eine Reform der Wohnbauförderung mit Auflagen zur energetischen Renovierung hätte negative Effekte für kleine Haushalte mit geringem Einkommen und Wohnungseigentum (die etwa durch Erbschaft erworben wurden). Die Zahl solcher Haushalte in Österreich ist allerdings relativ gering. Große Haushalte mit höherem Einkommen sind hier in der Regel auch Eigenheimbesitzer. Im Vergleich zu allen anderen Haushaltstypen (mit oder ohne Wohnungseigentum), wären große Haushalte mit hohen Einkommen von dieser Maßnahme stärker betroffen als kleinere Haushalte mit geringerem Einkommen.

Unternehmen

Wie bereits im Abschnitt 6.4.1 in den Szenarienanalysen gezeigt wurde, stellt der Klimaschutz für Unternehmen, insbesondere im Industriebereich, eine besondere Herausforderung dar. Dabei besteht in diesem Sektor deutliches Potenzial zur Emissionsvermeidung durch Prozessintegration und Zusammenarbeiten zwischen dem produktiven Gewerbe und dem Sektor Energieumwandlung (z. B. Möglichkeiten der Abwärmeauskopplung, Ko-Produktion von Strom, Dampf, Wärme, Kälte, energetische Nutzung von Abfallstoffen). Auch wenn Details von technischen Prozessen und Infrastrukturen im Industriebereich oft als Betriebsgeheimnis unveröffentlicht bleiben, bestehen in diesen Sektoren gemeinsame Interessen, durch die bei Verbesserungen der industriellen Prozesse Möglichkeiten des Klimaschutzes entstehen. Neben inkrementellen Fortschritten der Prozesstechnik durch graduelle Änderungen, bestehen im produzierenden Gewerbe auch erhebliche Möglichkeiten für Emissionseinsparungen durch radikale Innovationen, z. B. dem Umstieg auf nachwachsende Rohstoffe statt petrochemischer Ausgangsmaterialien, Verwendung von „green chemistry", etwa enzymbasierten, biokatalytischen Verfahren, statt konventionellen Prozessen mit hohen Temperatur- und Druckbereichen, etwa in der Faser- und Textilindustrie. Der Energieverbrauch im Industriebereich insgesamt ist substantiell, die Zahl der Akteure ist hingegen im Vergleich zum Haushaltssektor überschaubar. Investitionsentscheidungen sind oft rationaler und langfristig orientiert und der Zugang zu Finanzmitteln für Verbesserungen der Energieeffizienz ist leichter insbesondere wenn die Industrieprozesse energieintensiv sind und die dabei erzielbaren Kosteneinsparungen substantiell sind. Um diese Veränderungen zu realisieren, sind langfristig antizipierbare Preissignale geeignete Lenkinstrumente. National und EU-weit koordinierte und bindende Effizienzziele haben daher eine zentrale Bedeutung und es bestehen zahlreiche Mechanismen und Strukturen, mit denen mögliche Wettbewerbsnachteile effektiv verhindert werden können. Aus anderen Bereichen der Umweltgesetzgebung (z. B. Ozonschutz, saurer Regen, Gewässerschutz) bestehen umfangreiche institutionelle Erfahrungen, wie solche Vorlagen de-facto umsetzbar sind.

Regionale Energieagenturen, die mit den verschiedenen Akteuren, Ressourcenpotenzialen und der Nachfragestruktur vertraut sind, können eine wichtige Rolle als Vermittler spielen, um etwa lokale Energiemärkte wie Wärmenetzwerke umzusetzen. In vielen der österreichischen Klima- und Energie-Modellregionen werden solche Ansätze bereits verfolgt. Regelmäßig verpflichtende, energiebezogene Zertifizierungen und Audits tragen bei harmonisierte Daten bereitzustellen und Integrationspotenziale zu lokalisieren. Energiedienstleistungsgesellschaften können letztendlich in Zusammenarbeit mit dem Finanzsektor die Umsetzung solcher Maßnahmen planen. Derzeit fehlt allerdings oft noch der politische Wille, effektive Sanktionsschritte bei Nichteinhalten vereinbarter Effizienzfortschritte gegenüber industriellen InteressenvertreterInnen durchzusetzen (etwa bei der Umsetzung der von der EU vorgegebenen Richtlinien zu Fortschritten der industriellen Energieeffizienz).

Im Weiteren wird zunächst auf zwei Energieszenarien mit mittelfristigem Zeithorizont (2030 bzw. 2020) verwiesen, in denen unter anderem auch Maßnahmen zur Reduktion der THG-Emissionen von Unternehmen analysiert wurden. Nachdem eine Vielzahl von Unternehmen (bzw. deren Verbände und Interessengruppen) bereits eigenständige Initiativen des Klimaschutzes ergriffen haben, werden im Folgenden eine Reihe dieser oft freiwillig unternommenen Ansätze vorgestellt.

Die im vorigen Abschnitt vorgestellte Studie „Energieszenarien 2030" behandelt im Szenario MZM sowohl den Industriesektor als auch den Energiesektor im Detail. Der überwiegende Teil der Industrie und insbesondere die größten Verbraucher sind allerdings bereits in das europäische System zum Emissionshandel eingebunden, so dass darüber hinausgehende Emissionsreduktionen nur über Verteilungsmechanismen (Versteigerungen bzw. Verteilung anhand von angestammten Rechten) oder durch eine weitere Verschärfung und

Reduktion der Emissionsrechte erreichbar sind Heller et al., 2011). Um Effizienzsteigerungen in der Nutzung von Elektrizität in unterschiedlichen Industriesektoren zu erreichen, wurden zusätzliche Politikmaßnahmen in der Szenarioanalyse implementiert. Im Gütertransportsektor wurden Maßnahmen zur Förderung energieeffizienter Transportmodi berücksichtigt, sowie Möglichkeiten der Reduktion von Transportvolumina durch Verbesserungen der Logistik.

Das Projekt e-co, finanziert vom Österreichischen Klima- und Energiefonds, untersuchte die Auswirkungen stringenten Klimaziele auf die Wirtschaft. Das SERI gemeinsam mit GWS und RWTH-Aachen waren im Projektteam. Vier Szenarien wurden entwickelt:

- Substitution fossiler Energieträger durch erneuerbare Quellen: Szenario „Wir nutzen die richtige Energie“
- Verbesserung der Energieeffizienz: Szenario „Wir nutzen Energie effizient“
- Reduktion des Energieverbrauchs durch Verhaltensänderungen: Szenario „Wir nutzen Energie verantwortlich“
- Integrierende Szenario: „Wir nutzen die richtige Energie verantwortlich und effizient“ beinhaltet alle Schwerpunkte der verschiedenen Szenarien in ausgewogener Form
- Um die Wirksamkeit einzelner Szenariomaßnahmen gegenüber dem Status Quo vergleichen zu können, wurde ein Referenzszenario (business-as-usual, BAU) gerechnet

Die Ergebnisse waren ernüchternd. Lediglich eines der Szenarien, erreichte das Ziel von 34 % Anteil erneuerbarer Energien am Verbrauch von Endenergie im Jahr 2020, wobei zur Berechnung des Anteils erneuerbarer Energieträger die von in der Richtlinie EG/2009/28 (EU, 2009) definierten Methoden verwendet wurden. Keines der Szenarien führte zu einer Emissionsreduktion von CO_2 unter den Wert von 1990 (62 Mio. t CO_2). Das Kyoto Ziel von Österreich wäre 13 % unter dem Wert von 1990 gelegen. Die traditionellen Szenarien, die sich entweder auf die Ausweitung erneuerbarer Energieträger konzentrieren oder auf die effiziente Nutzung von Energie, sind hilfreich, um Wege zu Änderungen im Energiemix und Einsparungspotenziale zu identifizieren. In der Klimawirkung war sogar das integrative Szenario „Wir nutzen die richtige Energie verantwortlich und effektiv“, das als einziges das 34 % Erneuerbare-Ziel erreicht hatte, unzureichend für die Erreichung der 2020 CO_2-Ziele. Die Emissionen wurden mit 67 Mt CO_2 errechnet. Auch in diesem Szenario wurden damit die CO_2-Ziele für 2020 nicht erreicht.

Zusammenfassend kann zu dieser Studie gesagt werden, dass in Österreich tiefgreifende Verhaltensänderungen die deutlichsten Klimaschutzpotenziale beinhalten. Eine Transformation zu einem nachhaltigen Energiesystem bringt darüber hinaus auch positiven Begleitnutzen für die österreichische Wirtschaft mit sich. Angemerkt werden sollte allerdings auch, dass die in den vergangenen Jahren bis 2012 erfolgte Ausweitung der erneuerbaren Energieträger bereits die im Referenz-Szenario bis 2020 zugrundeliegenden Trends deutlich übersteigt.

Neben den regulatorischen Ansätzen des Klimaschutzes sind im privatwirtschaftlichen Bereich insbesondere auch freiwillige Initiativen zum Klimaschutz als Beispiele verantwortlichen Wirtschaftens anzuführen. Das Carbon Disclosure Project (CDP) ist beispielsweise eine wirtschaftsnahe, internationale und gemeinnützige Organisation, die ein internationales System zur Messung und Darstellung von Umweltdaten für Unternehmen und Städte anbietet (CDP, 2013). Es motiviert Firmen, relevante Umweltdaten in vergleichbarer Weise offenzulegen und ermöglicht so Maßnahmen zu erarbeiten um negative Umwelteinflüsse und den Ressourcenverbrauch zu minimieren. Das CDP erstellte auf diese Weise eine umfassende Sammlung von Primärdaten zu Klimawandel sowie zu Risiken im forstwirtschaftlichen Bereich und zur Wassernutzung und kann diese für strategische Entscheidungen im privatwirtschaftlichen Bereich, für Investitionsberatungen oder Politikmaßnahmen zur Verfügung stellen. Es behauptet, die weltweit umfassendste Datensammlung zu Energieverbrauch und THG-Emissionen geschaffen zu haben, die etwa 26 % der anthropogenen CO_2-Emissionen abdeckt, so sind etwa auch die 250 größten Stromproduzenten eingebunden.

Viele der gesammelten Daten wurde vorher in vergleichbarer Weise noch nie zentral erfasst. Diese Information wird insbesondere für InvestorInnen, Firmen und regulierende Instanzen als nützlich angesehen, um wohlüberlegte Entscheidungen treffen zu können, die auch zukünftige Risiken durch sich möglicherweise änderndes Umweltrecht, mögliche zukünftige Haftungsfragen und gerichtliche Klagen, sowie sich ändernde Grundeinstellungen von KonsumentInnen gegenüber Hauptverursachern des Klimawandels berücksichtigen. Eine Abschätzung der Marktgröße von energiebezogenen Investitionsgütern (Kraftwerken, Raffinerien etc.) des CDP in den kommenden 30 Jahren liegt bei etwa 27 Bio. (10^{12}) US$.

Entsprechend der ökologischen Modernisierung hält das CDP es für entscheidend, dass Technologien über marktwirtschaftliche Prozesse ausgewählt und umgesetzt werden. Dem folgend sollte (a) der Energieeffizienz von Investitionsprojekten eine höhere Bedeutung gegeben werden; (b) aktuelle Emissionen sowie geplante Reduktionsziele von Firmen publik gemacht werden; (c) neuartige emissionssparende Ge-

schäftsmodelle entwickelt werden; (d) die Preisentwicklung für Klimagasemissionen in verschiedenen Szenarien ermittelt werden und davon abhängig Veränderung der Wirtschaftlichkeit alternativer Energiequellen analysiert werden.

Für individuelle Berichte von Firmen im Rahmen der privatwirtschaftlichen Umweltverantwortung (CSR) wurden verschiedene Gütesigel und Berichtsysteme etabliert. Der Kohlenstofffußabdruck spielt dabei eine zunehmende Bedeutung zur Konsumenteninformation. Fußabdrucksberechnungen für Firmen können entlang unterschiedlicher und einander ergänzender Bilanzrahmen erstellt werden. Drei Ebenen werden dabei unterschieden: (1) „scope 1 carbon footprint" umfasst die direkten Emissionen aller Aktivitäten des Unternehmens, inklusive der Gebäude und der Verwaltung, industrieller Prozesse, Fahrzeuge etc.; (2) „scope 2 carbon footprints" berücksichtigen Emissionen von energiebezogenen Prozessen die außerhalb („up- und downstream") der unternehmenseigenen Verantwortlichkeit stattfinden (z. B. Elektrizitätserzeugung, Fernwärme, Raffinerieprodukte); (3) werden Inventare für „scope 3" Emissionen oft produktspezifisch und auf eine Konsumeinheit bezogen berichtet. Sie betrachten Emissionen über den gesamten Lebenszyklus eines Produkts oder einer Dienstleistung. Dabei werden Emissionen über die gesamte Wertschöpfungskette betrachtet: bei der Gewinnung der Rohmaterialien (die oft durch Zulieferfirmen erfolgt), bei der eigentlichen Produktherstellung, bei Nutzung des Produkts durch KonsumentInnen, sowie bei der Wiederverwertung oder Entsorgung. Betrachtungen dieser Ebene sind am komplexesten, weil spezifische Abgrenzungen zu treffen sind und vielfache Risiken von Doppelzählungen bestehen. Sie informieren aber, an welcher Stelle des Lebenszyklus Klimaschutzmaßnahmen am effizientesten eingesetzt werden können und ermöglichen KonsumentInnen direkte Vergleiche zwischen Produkten und Dienstleistungen herzustellen und somit den Konsum klimafreundlich auszurichten. Der erste Kohlenstofffußabdruck von Produkten wurde vom „Carbon Trust" (2006) registriert und die inzwischen abgeschlossene Entwicklung des ISO Standards 14067 hat erheblich zum methodischen Verständnis von Kohlenstofffußabdrücken beigetragen.

Kohlenstofffußabdrucksrechner ermöglichen eine automatisierte Berechnung des ökologischen Fußabdrucks von Klimagasemissionen und funktionieren auf der Ebene von Haushalten oder von Einzelpersonen. Letztere berücksichtigen normalerweise den Aufwand für Wohnraum, Mobilität, Ernährung und Konsum (Schächtele und Hertle, 2007). Einige Rechner beinhalten auch Emissionen durch genutzte Infrastruktur oder durch das soziale Umfeld und weitere Dienstleistungen die im Entscheidungsbereich einer Person stehen. Sie zeigen auf diese Weise, dass individuelle Entscheidungen sehr wohl einen Unterschied machen können, aber ein erheblicher Anteil an Umweltwirkungen auch durch gesellschaftliche Umstände bedingt ist.

Ein Beleg dafür, dass das Problembewusstsein zum Klimaschutz in der Bevölkerung inzwischen sehr wohl wahrgenommen wird und „in der gesellschaftlichen Mitte angekommen ist", kann daran gesehen werden, dass nahezu alle in Österreich operierenden Einzelhandelsketten inzwischen speziell klimafreundliche Produktlinien eingeführt haben.

Unternehmen haben großes Potenzial als Klimaschutzakteure, vor allem unter klimaschutzorientierten Rahmenbedingungen. Die Wirkung freiwilliger Initiativen und Vereinbarungen in der Privatwirtschaft blieb bisher aber eher inkrementell denn transformativ.

Staat

Wesentliche Elemente, Strategien und Herausforderungen österreichischer Klimapolitik wurden bereits in Band 3, Kapitel 1 vorgestellt. Als Ergänzung zur ursprünglich 2002 im Ministerrat beschlossenen, und 2007 erneut überarbeiteten Klimastrategie, ist die im März 2010 vorgestellte Österreichische Energiestrategie die umfassendste und detaillierteste Sammlung von Maßnahmen zum Klimaschutz unterschiedlicher Akteure.

In der Klimastrategie finden sich bereits neben einer Bestandsaufnahme wichtiger Klimaschutztechnologien für die Bereiche Energie, Verkehr und Landwirtschaft ein detaillierter Maßnahmenkatalog, der unter anderem ambitionierte Vorschläge wie z. B. eine Steigerung der Sanierungsrate des Gebäudebestands von 1,4 %/Jahr (thermische Sanierung sogar nur 0,8 %) zwischen 1991 und 2001 auf zumindest 3 %/Jahr, mittelfristig bis 5 %/Jahr vorschlägt. Allerdings werden diese Maßnahmen bisher nicht durch bindende gesetzliche Vorgaben verschränkt.

Mehrere Arbeitsgruppen entwickelten eine Energiestrategie und stellten sie 2010 der Bundesregierung vor. Drei Hauptstrategierichtungen wurden darin erarbeitet: Verbesserung der Energieeffizienz, Erhöhung des Anteils an erneuerbaren Energiequellen, sowie Sicherstellung der Energieversorgung. Weiters wurde das Ziel der Stabilisierung des Energieverbrauchs auf dem Wert von 2005 (1 100 PJ) bis 2020 bekräftigt.

Das 2011 verabschiedete Klimaschutzgesetz, das sich mit verwandten Themen befasst, lässt jedoch zentrale Fragen der Lastenverteilung zwischen Bund, Ländern und Gemeinden bei Nichterreichen der Ziele (z. B. Kostenaufteilung für mög-

licherweise nötige Zukäufe von handelbaren Emissionszertifikaten) ungelöst (siehe auch Band 3, Kapitel 1).

Als EU-Mitglied ist Österreich zur Steigerung der Energieeffizienz verpflichtet. Dementsprechend sollen laut dem derzeit als Gesetzesentwurf vorliegenden Energie-Effizienzgesetz EnergieverbraucherInnen zu höherer Effizienz motiviert werden. Der Entwurf ist jedoch noch in Diskussion.

Zivilgesellschaft

An verschiedenen Stellen wird der Ruf nach verstärkter direkter Partizipation der BürgerInnen an Europäischer Klimapolitik geäußert. Eine Reihe von Initiativen eröffnet dazu Möglichkeiten, wenn auch bisher nur in begrenztem Maße. So eröffnet eine Transformation des Energiesystems in Richtung hoher Anteile erneuerbarer Energiequellen, Optionen zur weiteren Demokratisierung der Energiemärkte.

Erneuerbare Energien bergen das Potenzial, einer breiten Zahl an AkteurInnen Teilhabe an diesem Markt zu ermöglichen und regionale Wertschöpfungsketten aufzubauen. Je nach regionaler Ressourcenausstattung und Energiebedarfsprofil bieten sich dabei eine Vielzahl unterschiedlicher energietechnologischer Lösungen an. Im Rahmen des Klima- und Energiefonds wurden in diesem Zusammenhang eine bedeutende Anzahl von Klima- und Energiemodellregionen gefördert. Seit seiner Gründung 2007 hat der Fonds bis 2012 rund 730 Mio. € an Fördermitteln in über 120 Modellregionen[3] ausgegeben). Eine räumliche Datenbank mit Vorzeigeprojekten („best practice") wurde erstellt und die AkteurInnen in der Region besser vernetzt, wodurch neue Wege sozialer Innovation entstanden.

Der Zugang zu Finanzierungsmöglichkeiten für erneuerbare Energiemaßnahmen stellt nach wie vor eines der wesentlichen Hindernisse auf dem Weg zur Transformation des österreichischen Energiesystems dar. Dennoch lassen sich Beispiele zivilgesellschaftlicher Initiativen für die Transformation zur Klimaverträglichkeit im Bereich des „Crowdfundings", dessen Ausgestaltung derzeit von der Finanzmarktaufsicht geprüft wird, anführen.

[3] http://www.waermeatlas.at/

6.4 Übersetzen (globaler) Transformationspfade in nationale und lokale Strategien zur Klimawandelvermeidung

6.4 Translating (global) transformation pathways into national- and local strategies of climate change mitigation

Die integrierten Bewertungsmodelle, in denen Szenarien zur wirtschaftlichen Entwicklung mit Ressourcen- und Energiesystemmodellen in Verbindung gesetzt werden und die Rückkopplungen auf Öko- und Klimasysteme untersuchen können, gehen aufgabengemäß von der globalen Skalenebene aus, die normalerweise in etwa 5 bis 25 globale Teilregionen untergliedert wird (Riahi et al., 2012). Nationalstaaten wie etwa Österreich sind im Rahmen dessen typischerweise nur als Komponente z. B. der Region „Westeuropa" enthalten. Weil Europa als politische Einheit und Akteur in der internationalen Klimapolitik auftritt, befassen sich allerdings eine Reihe von Studien mit koordinierten Klimaschutzstrategien auf der Ebene der EU-27. Abbildung 6.7 zeigt beispielsweise einen möglichen Weg zur Reduktion von Klimagasen im Ausmaß von 80 % bis 2050 im Vergleich zu 1990 der im europäischen „Fahrplan für den Übergang zu einer wettbewerbsfähigen CO_2-armen Wirtschaft 2050" (Europäische Kommission, 2011) vorgestellt wurde. Bedeutend ist dabei unter anderem, dass zum Beispiel die schwer kontrollierbaren „Nicht-CO_2-Gase", etwa aus dezentralen Quellen wie der Landnutzung und in sonstigen Sektoren, in der Zukunft einen relativ großen Teil der Gesamtemissionen ausmachen werden, während etwa der Sektor Energieaufbringung sehr viel höhere Reduktionsziele erreichen muss und bis 2050 praktisch CO_2-neutral werden muss. Auch werden in diesen Szenarien wichtige Zwischenziele jenseits von 2020 (etwa 2030) konkretisiert. Ähnlich wie bei den in Österreich empirisch beobachteten sektoralen Emissionstrends wurde auch in diesem Szenario zunächst ein massiver Anstieg der transportbedingten Emissionen (+30 % bis 2005) berücksichtigt (siehe Tabelle 6.8).

Ausgehend von diesen ambitionierten Zielen, sind für die EU-27 eine begrenzte Anzahl von Studien durchgeführt worden, die umfangreiche Energiesystemtransformationen modellieren, also z. B. sowohl eine Transformation der Energieaufbringung (durch massiven Ausbau der regenerativer Energieträger) berücksichtigen, als auch deutliche Ambitionen die wachsende Energienachfrage zu begrenzen und so einen relativ hohen Anteil erneuerbarer Energieträger bis 2050 erreichen. So beschäftigte sich z. B. das vor kurzem an der Stanford

University durchgeführte Energy Modelling Forum Nr. 28 (EMF28) mit einem Vergleich unterschiedlicher Modellresultate zu diesem Thema (Weyant et al., 2013).

Die im Rahmen des EMF-28 verglichenen Szenarien unterstützen im wesentlichen die früheren, dem Energiefahrplan zugrundeliegenden Modellergebnisse. Fast alle Modelle konnten bis zum Jahr 2050 die THG-Emissionen um 80 % reduzieren mit relativen geringen BIP-Kosten bis 2040; jedoch in einigen Modellen, nahmen diese Kosten ab dem Jahr 2050 stark zu. Ausführliche Modellanalysen deuteten darauf hin, dass Verbesserungen in der Energieeffizienz die Hauptursache der rückläufigen Emissionen waren (Weyant et al., 2013).

Einige Studien erlauben eine kohärente Disaggregation in nationale (und zum Teil subnationale) Einheiten, und können so der Planung von technisch robusten und kosteneffizienten Transformationsstrategien dienen.

Dazu gehört etwa die im Auftrag von Greenpeace (und dem European Renewable Energy Council) am Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR) in Auftrag gegebene Studie Energy[R]evolution die auf globaler Ebene (Greenpeace International, 2012), auf EU Ebene (Greenpeace International, 2005), und am IHS auch für die nationale Ebene (Greenpeace Austria, 2011) durchgeführt wurde. Während sich diese Studie auf die technische Machbarkeit und die Auswirkung dezentraler Stromerzeugung konzentriert, führt sie keine detaillierte Kostenanalyse für den Umbau der Stromerzeugung durch, in der auf nationaler Ebene Preiseffekte und makroökonomische Auswirkungen im Detail analysiert werden.

Die European Climate Foundation ist ebenfalls eine NGO, die sich für einen besseren Klimaschutz auf EU-Ebene einsetzt. Sie hat zu diesem Thema eine umfassende und technisch aufwändige Studie mit dem Titel „Roadmap 2050 – a practical guide to a prosperous low carbon europe“ (European Climate Foundation, 2010) vorgelegt. Ausgehend von einem Backcasting Szenario, das vom 80 % Emissionsziel 2050 ausgeht, zeigt sie darin, dass der oben skizzierte Umbau des europäischen Energiesystems bereits mit existierenden Technologien durchgeführt werden kann und dazu keine weiteren Innovationen erforderlich sind. Selbst unter relativ konservativen Annahmen (etwa der Preistrendprognose für fossile Energieträger der IEA und konservativen Lernkurven für Wind und Photovoltaik) sind nur kurzfristig geringe BIP-Einbußen (weniger als 0,1 %) errechnet, die im späteren Szenarioverlauf durch höhere Wettbewerbsfähigkeit überkompensiert werden würden. Die anfänglich höheren Investitionskosten, die sich auf jährlich etwa 250 € pro Haushalt in Form von höheren Stromkosten belaufen, würden langfristig durch insgesamt geringere allgemeine Energieausgaben (wegen umfangreicher Maßnahmen zur Energieeffizienz) aufgewogen. Ebenso wie bei der von Greenpeace in Auftrag gegebenen Studie (Greenpeace International, 2011) wurde auch bei der ECF Studie in einem Zusatzbericht (European Climate Foundation, 2011) auf die erheblichen Kostenreduktionen und vielfältigen Begleitnutzen hingewiesen, wenn dieser fundamentale Umbau und die Integration höherer Anteile an erneuerbaren Energieträgern in einer europaweit akkordierten Form erfolgt, sowie durch Ausweitungen der Übertragungsnetze und europaweiten Energiemärkte begleitet wird. Die Studie zeigt überdies, dass auch bei einem vorwiegend dezentralen Ausbau der erneuerbaren Quellen (50 % der Photovoltaikerzeugung als Auf-Dach-Anlagen) die Investitionen in den Netzausbau erforderlich wären. Bezüglich zusätzlichem Aufwand an Speichertechnologie wie weiterer

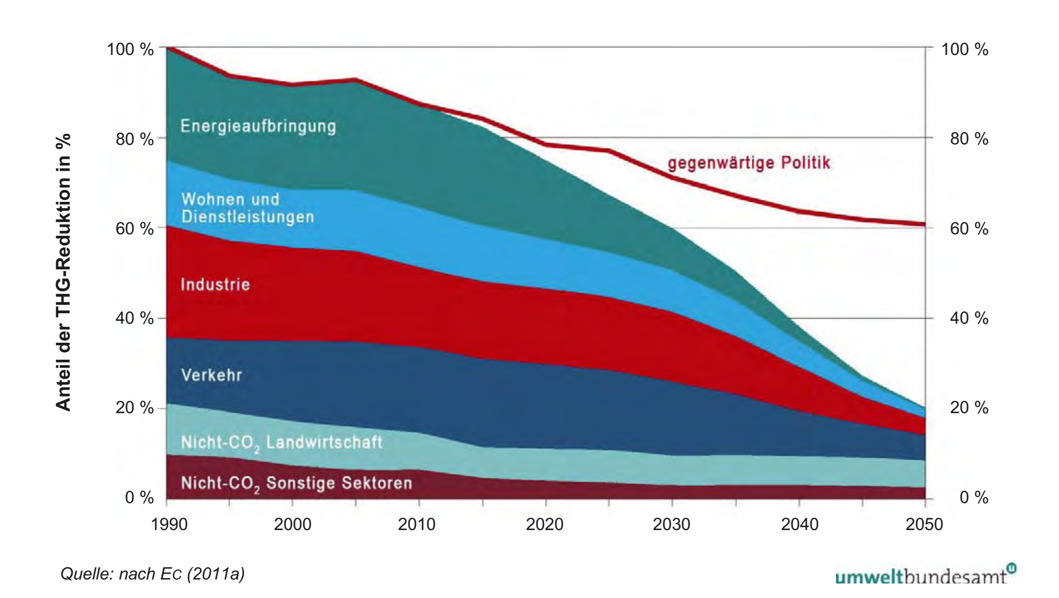


Abbildung 6.7 Roadmap zur Klimastabilisierung der EU-27; Quellen: Europäische Kommission (2011). Anderl et al. (2013)

Figure 6.7 Roadmap towards climate stabilisation for the EU-27. Sources: Europäische Kommission (2011); Anderl et al. (2013)

Tabelle 6.8 Emissionssenkungen einzelner Sektoren. Quelle: Europäische Kommission (2011)
Table 6.8 Potential emission reductions of various sectors. Source: Europäische Kommission (2011)

THG-Emissionsverringerung gegenüber 1990	2005	2030	2050
Insgesamt	−7 %	−40 bis −44 %	−79 bis −82 %
Sektoren			
Stromerzeugung (CO_2)	−7 %	−54 bis −68 %	−93 bis −99 %
Industrie (CO_2)	−20 %	−34 bis −40 %	−83 bis −87 %
Verkehr (einschl. CO_2 aus der Luftfahrt, ohne Seeverkehr)	+30 %	+20 bis −9 %	−54 bis −67 %
Wohnen und Dienstleistungen (CO_2)	−12 %	−37 bis −53 %	−88 bis −91 %
Landwirtschaft (Nicht CO_2)	−20 %	−36 bis −37 %	−42 bis −49 %
Andere Nicht-CO_2-Emissionen	−30 %	−72 bis −73 %	−70 bis −78 %

Pumpspeicher, oder Einbindung der Speicherkapazität von Elektrofahrzeugen kommt die Studie zu dem Schluss, dass diese Speicher nicht notwendigerweise ausgebaut bzw. integriert werden müssten, falls sie jedoch zur Verfügung stünden, diese den Bedarf an „Backup Kapazität" und rasch verfügbaren Regelenergiequellen verringern würden, also zur weiteren Kostensenkung beitragen würden.

Eine zu enge Bewertung der Szenarien ausschließlich auf Grundlage ihrer Klimawirkung und/oder Kostenstrukturen greift allerdings zu kurz. Volkswirtschaftliche Planungsentscheidungen müssen notwendigerweise eine breitere Palette an Kriterien heranziehen, um zu nachhaltigen Entscheidungsfindungen zu gelangen. Einige Zusatzargumente seien daher hier angeführt:

In Österreich betrugen die Nettoausgaben für den Import fossiler Energieträger nach Österreich im Jahr 2011 rund 15,66 Mrd. €, etwa 3,8 % des nominellen Bruttoinlandprodukts (BMWFJ, 2013). Eine deutliche Erhöhung lokal produzierter Energie würde neben einer Entlastung der Handelsbilanz auch die Versorgungssicherheit verbessern, ein Risikofaktor der sich nur unzureichend monetär ausdrücken lässt.

Positive Effekte sind auch durch Verbesserungen der Luftqualität durch Substitution von Verbrennungsmotoren und thermischen Kraftwerken zu erwarten: Da der Kfz-Bestand in Österreich derzeit durch einen außerordentlich hohen Anteil (56,4 %) an Dieselfahrzeugen gekennzeichnet ist, von dem weniger als die Hälfte mit Partikelfiltern ausgerüstet sind (VCÖ, 2012), wären mit einem Umbau in Richtung Elektromobilität auch erhebliche Verbesserungen der Luftqualität verbunden, deren Effekte auf Gesundheit und Umwelt hier ebenfalls nicht monetär berücksichtigt wurden.

Im Vergleich zu konventionellen Energieträgern weisen erneuerbare Energiequellen auch weitere direkte positive volkswirtschaftliche Effekte auf, etwa wesentlich höhere Beschäftigungseffekte pro generierte Energieeinheit. Diese Tendenz ist auch für Maßnahmen zur Verbesserung der Energie-Effizienz zu beobachten.

Im Jahr 2012 lag der primäre wirtschaftliche Umsatz im Bereich erneuerbarer Energien bei 5,9 Mrd. €, und sie sicherten rund 38 800 vollzeitäquivalente Arbeitsplätze. Makroökonomische Simulationsanalysen zeigen etwa, im Jahr 2011 eine Erhöhung des BIP um rund 1,6 Mrd. € im Vergleich zu einem Szenario in dem kein Ausbau basierend auf erneuerbaren Energieträgern seit dem Jahr 2000 stattgefunden hätte (Biontner et al., 2013). Im besagten Zeitraum haben zusätzliche Erneuerbare jährlich rund 398 Mio. €, oder 0,1 % zur Erhöhung des BIP beigetragen, sowie jährlich rund 3 300 neue Beschäftigungsverhältnisse geschaffen. Da diese Effekte oftmals in strukturschwachen, ländlichen Räumen stattfinden, sollten Studien zu räumlichen Aspekten der Wertschöpfungsketten unternommen werden, um das Potenzial erneuerbarer Energieträger als strukturfördernde Maßnahme besser berücksichtigen zu können.

6.4.1 Politikmaßnahmen

Institutionen und Ziele

Die in der österreichischen Energiestrategie anvisierten Ziele zum Ausbau erneuerbarer Energien und zur Energieeffizienz orientieren sich an den EU Zielen für 2020, die eine EU-weite Reduktion der Emissionen um 20 % gegenüber 1990 anstreben. Ausgehend von verschiedenen globalen Klimaschutzszenarien bestehen ernsthafte Zweifel, ob die von der EU vorgegebenen Reduktionsziele für 2020 ausreichend sind, um das langfristig anvisierte Ziel einer Stabilisierung des Temperaturanstiegs unter 2 °C kosteneffizient zu erreichen (WBGU,

2009). Stattdessen werden für Industrieländer stringentere Emissionsziele im Bereich von -25 bis -40 % für 2020 diskutiert, was auch mit den illustrativen Reduktionspfaden im „Fahrplan für den Übergang zu einer wettbewerbsfähigen CO_2 armen Wirtschaft 2050" nahegelegt wird.

Umgelegt auf Österreich werden die EU-2020-Ziele derzeit als Reduktionsverpflichtung von etwa 3 % gegenüber 1990 interpretiert. Das ist ein bedeutend niedrigeres Klimaschutzziel für 2020 als Österreich ursprünglich im Zuge der ersten Kyoto-Periode bereits für 2012 anvisierte. Als überdurchschnittlich wohlhabendes Land innerhalb der EU, das außerdem relativ großzügig mit erneuerbaren Energiepotenzialen ausgestattet ist, sollte sich Österreich in seinen Klimaschutzzielen für 2020 zumindest an den ursprünglichen Kyoto-Zielen (-13 % Emissionen im Vergleich zu 1990) orientieren.

Aktuelle Studien zu den Auswirkungen Konjunkturkrise von 2008 bis 2010 im EU-Raum kommen darüber hinaus zum Schluss, dass die Krise dazu beigetragen hat, dass die EU-2020-Ziele von -20 % THG-Emissionen deutlich günstiger zu erreichen sind als ursprünglich angenommen und diese mit zusätzlichem Aufwand sogar übererfüllt werden könnten (Anderl et al., 2011). Die Zusatzkosten, um bis 2020 eine Emissionsreduktion von -30 % zu erreichen, lägen lediglich 16 % über jenen, die ursprünglich zum Erreichen des -20 % bis 2020 angesetzt wurden. Mögliche Maßnahmen dazu wären eine Reduktion der Emissionsgrenze („cap"), also der im Auktionstopf verfügbaren Menge an Emissionszertifikaten. Ein begrüßenswerter Begleiteffekt dieser Maßnahme wäre eine Stabilisierung des Preises für Emissionszertifikate, der für die Wirtschaftlichkeit zahlreicher Klimaschutzprojekte von großer Bedeutung ist.

Insgesamt ist im Gegensatz zur österreichischen Klimapolitik der jüngeren Vergangenheit eine Verstetigung und langfristige Planbarkeit der Klimaziele anzustreben, um Investitionsrisiken zu minimieren: langfristig bindende Klimaziele, wie sie etwa im Britischen Climate Change Act von 2008 mit einem Ziel von -80 % bis 2050 festgeschrieben sind, ermöglichen privatwirtschaftlichen AkteurInnen vorausschauende Planungsentscheidungen für langlebige Infrastruktur treffen zu können. Um dabei Toleranz gegenüber Konjunkturschwankungen beizubehalten, können derartige Ziele auch lediglich in Form von Zielvorgaben der THG-Intensität formuliert werden, statt in Form von „harten", quantitativen Zielformulierungen.

Eine grundsätzliche Politikmaßnahme sollte die umfassende Evaluierung von Fördermitteln und Subventionen auf mögliche Klimaeffekte der Maßnahmen beinhalten. Das betrifft insbesondere z. B. die im EU-Vergleich niedrigen Mineralölsteuern, die Pendlerpauschale, die Wohnbauförderung soweit sie nicht mit Auflagen zur Energieeffizienz verknüpft ist, den steuerbefreiten Flugverkehr und steuerbegünstigter Firmenwagen.

Eine Schlüsselbedeutung kommt auch der Unterstützung neuer Anreizsysteme zu, die Handeln direkt beeinflussen und auch neue Wirtschaftsmodelle entstehen lassen und so die Energienachfrage bremsen kann. ESCOs (Energy Service Companies) sind ein Beispiel eines solchen Wirtschaftsmodells. Sie verfügen selbst oder in Verbindung mit einem Finanzinstitut über einen Fördertopf, aus dem Kapitalmittel bezogen werden können, um Verbesserungen der Energieeffizienz von Anlagen oder Gebäuden durchführen zu können. Ein Teil der dann eingesparten Energieausgaben wird in Folge dazu verwendet, die Investitionen in effizienzsteigernde Maßnahmen dem Fördertopf zurückzuzahlen.

Eine wesentliche Rolle werden in der Transformation zur klimaverträglichen Energieinfrastruktur partizipative Planungsprozesse spielen. Diese sind unbedingt erforderlich, um die lokale Akzeptanz gegenüber den neuen und dezentralen Energietechnologien, sowie den erforderlichen Übertragungsnetzwerken zu fördern.

In der Beurteilung von neuen Technologien ist darüber hinaus eine Orientierung entlang einer Vielzahl von Kriterien nötig (Multikriterienansatz) und eine integrativ sozio-ökologisch orientierte Entscheidungsfindung anstelle von kurzfristig und eng definierten Kosten-Nutzen Rechnungen.

Nationales Vorgehen sollte darüber hinaus international akkordiert werden, sowohl mit den umgebenden EU-Mitgliedsstaaten, als auch mit der weltweiten Staatengemeinschaft und insbesondere in Partnerschaft mit Entwicklungsländern (z. B. durch Zusammenarbeit im Bereich von Technologietransfers, wie den Initiativen „Sustainable Energy for All").

Marktinstrumente

Die in der Ökonomie entwickelten Marktmechanismen haben in der Klimapolitik ihr wohl bisher größtes Anwendungsgebiet gefunden. Im Gegensatz zu Normen/Richtwerten, welche fixe Standards festsetzen, bieten Marktmechanismen ökonomische Anreize zur Vermeidung, indem sie den Ausstoß von CO_2 verteuern oder Kosten von CO_2-freier Energiegewinnung vermindern. Die dahinterstehende Idee ist, dass der Regulator nicht in Kenntnis aller Vermeidungskosten ist und stattdessen dem Market einen Anreiz zur Hebung der günstigsten Vermeidungspotentiale setzt. Die zwei grundlegenden Instrumente sind die einer Preiskontrolle oder einer Mengenkontrolle. In der Theorie können

beide ein identisches Ergebnis erreichen (Weitzmann, 1974). In der Praxis jedoch bestehen erhebliche Unsicherheiten und Informationsasymmetrien zwischen einzelnen AkteurInnen, so dass jedes Instrument mit Vor- oder Nachteilen verbunden ist. Bei der Preissteuerung müsste der Regulator die genauen Vermeidungskostenkurven kennen, um die Steuer so setzen zu können, dass ein vorgegebenes Minderungsziel mit den günstigsten Vermeidungsoptionen erreicht werden kann. Bei der Mengensteuerung hingegen wird die Suche dem Markt überlassen und es bildet sich ein Zertifikatspreis, welcher die marginalen Vermeidungskosten widerspiegelt. Hier muss ein Gesamtemissionsbudget festgelegt werden, welches oft einfacher zu bestimmen ist, da Informationen über noch zulässige Emissionsbudgets im Gegensatz zu detaillierten Kosteninformationen politischen EntscheidungsträgerInnen oft vorliegen bzw. sich aus naturwissenschaftlichen Erkenntnissen ableiten lassen. Allerdings wird der Emissionspreis abgesehen vom Emissionsbudget auch stark von exogenen Parametern wie der wirtschaftlichen Entwicklung beeinflusst. Dies äußert sich in großen Unsicherheiten des Zertifikatspreises in Form von Volatilität, was das Risiko für InvestorInnen erhöht, Vermeidungsoptionen auszuüben. Im Theorie-/Idealfall würde ein Instrument zur CO_2-Vermeidung global ausgestaltet sein, um die höchste Effizienz zu erreichen und Spill-Overs zu vermeiden. In der Praxis jedoch – und aus Gerechtigkeitsgründen – sind Nationalstaaten mit Minderungszielen belegt und setzen Marktinstrumente ein, um diese zu erreichen.

Kohlenstoffbepreisung

Durch eine Bepreisung von CO_2 können Produktions-, Konsum- und Investitionsentscheidungen systematisch in Richtung Klimaverträglichkeit gelenkt und die Dekarbonisierung der Energiesysteme sowie eine klimaverträgliche Urbanisierung und Landnutzung beschleunigt werden (WGBU, 2011). Dahinter steht die Überlegung, dass die aktuell freigesetzten Emissionen gegenwärtigen und zukünftigen Generationen gegenüber Kosten verursachen, z. B. durch Anstieg der Durchschnittstemperaturen, Änderungen der Wettermuster und steigende Meeresspiegel, dass diese Kosten aber gegenwärtig nicht in Marktvorgängen abgebildet werden. Wenn solche Kosten quantifizierbar sind, würde Kohlenstoffbepreisung es erlauben, diese zu internalisieren, wenn ein angemessener Preis auf jede emittierte Tonne an Kohlenstoff aufgeschlagen werden würde. Indem Käufer für Güter und Dienstleistungen proportional zu deren Klimawandelauswirkung mehr zahlen müssten, besteht für sie ein Anreiz zu Alternativen mit geringeren Klimawandelauswirkungen zu wechseln – und für die ProduzentInnen ein Anreiz, den Kohlenstofffußabdruck der Güter und Dienstleistungen, die sie produzieren, zu reduzieren. Das ist der Grundgedanke des Emissionshandelssystems der Europäischen Union (EU-ETS; siehe Band 3, Kapitel 3).

Das Europäische Emissionshandelssystem (EU-ETS) ist ein auf Mengenkontrolle basierendes Marktinstrument, welches ökonomische Anreize setzen soll, die von der EU sich selbst gesteckten Klimaziele, sowie die von der EU eingegangenen Verpflichtungen unter dem Kyoto Protokoll, möglichst kostengünstig zu erreichen (WBGU, 2014). Das System ist seit seiner Einführung stetig weiterentwickelt worden, um auf neue Entwicklungen zu reagieren oder Verbesserungen vorzunehmen. Eine Reformmaßnahme ist die zeitliche Verschiebung der Auktionierung von 900 Millionen Emissionsrechten auf das Ende der Handelperiode 2019/2020 („Backloading"), da in der zweiten Handelsperiode erhebliche Überschüsse angefallen sind, was zu einem Einbrechen des Preises für Emissionsberechtigungen auf drei bis vier Euro pro Tonne CO_2 geführt hat. Dieses niedrige Preisniveau, verbunden mit der Unsicherheit über die zukünftige Preisentwicklung bietet Investoren nicht die notwendigen Anreize, in klimafreundliche Technologien zu investieren. Dies wäre jedoch notwendig, um langfristige europäische Klimaziele zu erreichen, Lock-in Effekte zu vermeiden und die Emissionsminderungskosten nicht ausufern zu lassen (etwa durch spätere Nichtnutzung CO_2 intensiver Infrastruktur) (WBGU, 2014). Die Überschüsse sind hauptsächlich aus zwei Gründen angefallen: Zum einen hat die jüngste Wirtschaftskrise zu einem (nicht vorhersehbaren) Einbrechen der Nachfrage nach Zertifikaten geführt und zum anderen stand ein großes Angebot an günstigen Projektgutschriften aus CDM Projekten. Auf letzteren Punkt hat die EU bereits reagiert, indem die EU die Quote für Zertifikate aus flexiblen Mechanismen für die dritte Handelsperiode stark beschränkt worden ist. Eine neue Studie (Koch et al., 2014) zeigt darüber hinaus, dass das Problem in der Ursache nicht nur bei der Wirtschaftskrise, den CDM Credits und den Erneuerbaren liegt, sondern auch bei anderen Faktoren, wie zum Beispiel die Glaubwürdigkeit des „long-term caps". Die Schwäche des EU-ETS in seinem gegenwärtigen Design besteht in der fehlenden Anpassungsfähigkeit des Caps (und damit der Preise) in Bezug auf diese exogenen „Schocks" (WBGU, 2014). Daher wären Maßnahmen zur Reform des EU-ETS deshalb zielführend, weil sie daran ansetzen das für transformative Investitionen notwendige Preissignal zu stabilisieren (Diekmann, 2012). In Frage kommen auch hier wieder eine direkte Steuerung der Preise oder eine Steuerung der Mengen, wie von der EU-Kommission vorgeschlagen („Market Stability Reserve"). Ein Preissteuerungsmechanismus lässt sich durch

das Setzen einer Preisuntergrenze bei Versteigerungen etablieren oder durch eine so-genannte „Kohlenstoffbank“, die bei Unterschreiten einer Preisgrenze eine bestimmte Menge an Zertifikaten in eine Reserve überführt und bei Überschreiten einer Preisgrenze wieder in den Markt einspeist. Allerdings würde eine solche Art der Preissteuerung in erster Linie dazu dienen, die Volatilität aus dem Markt zu nehmen, nicht jedoch ausreichen um dauerhaft strukturelle Defizite beseitigen zu können. Deshalb besteht eine weitere Maßnahme darin, das Cap flexibel an äußere Entwicklungen anzupassen, so wie es beispielweise in Australien mit dem „rollierenden Cap“ vorgesehen war, welches alle fünf Jahre nachjustiert werden sollte. Eine weitere Möglichkeit wäre, das Cap an die Entwicklung relevanter exogener Parameter (wie z. B. die wirtschaftliche Entwicklung) zu knüpfen.

In einigen Fällen sind auch Emissionssteuern eingeführt worden und haben sich in praktischen Anwendungen durchaus bewährt und als wirkungsvoll erwiesen Emissionen zu reduzieren (IPCC, 2014b).

Kohlenstoffbepreisung ist wichtig (siehe auch IPCC, 2014b), doch die Umsetzung ist schwierig, da (a) relevante Märkte (z. B. ETS-Märkte) politische Märkte inklusive der damit verbundenen Probleme sind, (b) KonsumentInnen von rationalen Verhaltensmustern abweichen und somit nicht entsprechend auf die gesetzten Anreize reagieren, (c) die sozialen Kosten von CO_2 nur unzureichend internalisiert werden bzw. Pläne dazu nicht transparent und mit langfristiger Bindung umgesetzt werden, um das Innovationsrisiko von Firmen in kohlenstoffarme Technologien zu reduzieren und (d) Pfadabhängigkeiten aufgrund von Infrastruktur, Wissen oder Routinen die Wirkung von Kohlenstoffpreiserhöhungen – zumindestens kurz- und mittelfristig – deutlich reduzieren. Das bedeutet, dass verstärkte Kohlenstoffbepreisung in Kombination mit anderen gut abgestimmten Politiken eingeführt werden müsste.

Eine Kohlenstoff-Blase könnte einem neuen Bericht (Carbon Tracker, 2013) zufolge entstehen, wenn Firmen ihre Investitionen ungeachtet ihrer zukünftigen Emissionen und den damit verbundenen, jedoch schwierig einzuschätzenden, Kosten planen.

Von first best zu second best Marktmechanismen

Wären CO_2-Emissionen die einzige Externalität der Energieerzeugung, wäre ein Marktinstrument, welches Emissionen zur Korrektur des Marktversagens verteuert das ökonomische Ideal („first-best policy“). Es gibt jedoch weitere theoretische und praktische Argumente zusätzlich zur Korrektur der CO_2-Externalität komplementäre Marktinstrumente zur Förderung der erneuerbaren Energien einzuführen (second best policy). Diese werde in der Folge kurz beleuchtet:

- Ein Argument ist, dass weitere Externalitäten der Energieerzeugung bestehen, welche unkorrigiert zu einem sozioökonomisch nicht optimalen Ausbau der erneuerbaren Energien führen würden und somit komplementäre Regulierungsmaßnahmen rechtfertigen können. Dazu gehören insbesondere Wissensspillover und Adoptionsexternalitäten (EFI, 2013): In Forschung und Innovation treten Externalitäten in Form von Wissensspillover auf. WettbewerberInnen können durch Inspektion innovativer Produkte und Prozesse an Wissen gelangen, ohne selbst die vollen Kosten für die Wissensproduktion tragen zu müssen. Umgekehrt bedeutet dies, dass InnovatorInnen nicht die vollen sozialen bzw. gesellschaftlichen Erträge ihrer Produkt- oder Prozessentwicklungen privatisieren können.
- Zudem bestehen – speziell im Falle von Mengenkontrolle – Preisunsicherheiten, welche bei risikoaversen AkteurInnen zu gesamtwirtschaftlich suboptimalen Investitionsanreizen führen können. Dieses Problem ist im Energiebereich von besonderer Bedeutung: Durch Unsicherheiten über langfristig verbindliche klima- und energiepolitische Ziele und deren regulatorische Umsetzung sowie einen vergleichsweise hohen Investitionsbedarf für F&E und lange Investitionszyklen von Energietechnologien. Zudem würden bei wenig ambitionierter Klimapolitik die kurzfristigen Anreize Carbon Lock-In zu vermeiden wahrscheinlich nicht ausreichen.
- Weitere Argumente rühren aus der Richtung, dass durch zusätzliche Förderung erneuerbarer Energien unerwünscht hohe Umverteilungseffekte vermieden werden können (Hirth und Ueckerdt, 2013): Indem man die erneuerbaren Energien – welche oftmals die teuersten Vermeidungskostenoptionen darstellen – gesondert subventioniert, erreicht man eine Absenkung der marginalen Vermeidungskosten und somit der CO_2-Steuer / des CO_2-Zertifikatspreises. Zudem kann dadurch auch vermieden werden, was im Allgemeinen unter „carbon leakage“ – also dem Export von THG-Emissionen – verstanden wird.

Allerdings gibt es auch Argumente, welche gegen eine zusätzliche Förderung erneuerbarer Energien angeführt werden:

- Ein Argument bezieht sich darauf, dass in Bezug auf CO_2-Einsparungen überhaupt kein zusätzlicher Effekt erreicht

wird (etwa durch abgesunkene CO_2-Preise; vgl. IPCC, 2014b), es dafür aber zu Verzerrungen kommt, dadurch dass tendenziell zu viele erneuerbare Energien zur CO_2-Reduktion genutzt werden – im Vergleich zu den kostengünstigsten Vermeidungsoptionen. Dieses Argument gilt aber nur für eine Mengenkontrolle mit einem sehr ambitionierten Cap und nicht für eine Steuer. Aber auch im Fall einer Mengenkontrolle können sich beide Instrumente ergänzen.

- Ein weiteres Argument ist unter Green Paradox bekannt (Sinn, 2012): Es bezieht sich darauf, dass die BesitzerInnen fossiler Ressourcen in Antizipation der sinkenden Nachfrage (durch den Ausbau erneuerbarer Energien) einen Anreiz haben, ihre Ressourcen noch schneller zu extrahieren und so den Klimawandel kurzfristig noch verschärfen. Dieses Argument, sofern valide, würde aber auch im Falle von ausschließlicher CO_2-Politik gelten, gegebenenfalls führen erneuerbare Energie-Politiken aber zu einem beschleunigten Ausbau eben dieser.
- Ein weiterer Punkt, der oft als Merit-Order Effekt diskutiert wird (Sensfuß, 2008) ist, dass der zunehmende Ausbau erneuerbarer Energien zu sinkenden Preisen am Großhandelsmarkt für Strom führt und es dadurch in Bezug auf das Klima zum adversen Effekt kommen kann, dass neu installierte Gaskraftwerke nicht eingesetzt werden und Kohlekraftwerke vermehrt CO_2 ausstoßen.

Infrastruktur und Innovation

Gegenwärtige Debatten über ein „Ausbalancieren" der Wirtschaft eröffnen eine Möglichkeit, Politikentscheidungen so zu beeinflussen, dass sie ein Wachstum fördern, das auch eine sauberere und grünere Wirtschaftsstruktur entwickelt. Es ist weitreichende Unterstützung für diese Ansicht zu finden, allerdings finden sich auch erheblich unterschiedliche Meinungen bei Detailfragen. Einige Forschergruppen argumentieren, dass Wirtschaftswachstum an sich das wesentliche Nachhaltigkeitsproblem darstellet (Jackson, 2009), während andere darin weniger ein Problem sehen, das Wachstum aber weniger emissions- und ressourcenintensiv gestalten wollen (Raingold, 2011). Hier ist nicht beabsichtigt, dieses Argument im Detail zu beleuchten. Diese Kritikpunkte betonen aber wichtige Argumente, über die Endlichkeit unserer natürlichen Ressourcengrundlage, über Probleme gegenwärtiger Konsummuster und dem problematischen Framing, das durch die Anwendung des BIPs als Fortschrittsindikator entsteht. Initiativen wie „Wachstum im Wandel" sind nützlich, um neue Konzepte vom Status einer Idee in Richtung einer politisch und ökonomisch umsetzbaren Alternative weiterzuentwickeln.

Ein Szenario, das Österreich in eine emissionsarme Gesellschaft umstrukturiert, erfordert teilweise radikale Umbaumaßnahmen, um ein Erreichen der legal bindenden post-Kyoto 2020-Ziele zu ermöglichen. Ebenso erfordert es deutliche Änderungen bei Gütern und Dienstleistungen, die von der österreichischen Wirtschaft produziert werden, in Richtung saubererer Technologien und nachhaltigerer Wirtschaftsmodelle. Erneuerungen von der Wurzel her und groß angelegte Investitionsprogramme werden notwendig sein, um dies zu erreichen.

Zentral ist dabei die Rolle der Innovation, sie erfordert vor allem Experimentierfreudigkeit, die von evolutionären ÖkonomInnen als Erfahrungslernen bezeichnet wird. Jene, die Innovationen unterstützen, müssen bereit sein Risiken einzugehen und zu akzeptieren, dass einige Technologien scheitern werden. Dies ist problematisch für einzelne Unternehmen, aber auch im Bereich öffentlicher Politikmaßnahmen, wo Scheitern durchwegs mit negativen Assoziationen verbunden ist. Darüber hinaus besteht durch die Förderung von spezifischen Technologien durch die öffentliche Hand die Möglichkeit, dass Regierungen von bestehenden Interessengruppen geleitet werden (Watson, 2012).

Einbindung von KonsumentInnen und Gemeinschaften

Ein Großteil der Energie- und Klimapolitik wird von zentralisierten und hierarchisch organisierten Maßnahmen und Institutionen strukturiert. Das liegt an einer veralteten Ansicht dazu, wie die Politikarena funktioniert und wird nicht ausreichend sein. Die Veränderung hin zu einer emissionsarmen Wirtschaftsform erfordert es, sich in neuer Weise mit den Anliegen von Konzernen, KonsumentInnen, BürgerInnen und Gemeinschaften auseinanderzusetzen. Klimapolitik erfordert es auch, Dinge in neuer Weise zu betrachten, z.B. von einem Fokus nur auf Preisstrukturen, auf das Erkennen von Potenzialen der Emissionsreduktion; von dem Wachstumsdogma hin zu einem kritischen Hinterfragen der Erwünschtheit von Wirtschaftswachstum als Ziel an sich.

Einige der Investitionskosten für emissionsarme Technologien und Infrastrukturen werden inzwischen in den Preisen, die KonsumentInnen zahlen, reflektiert. Dadurch wurde eine erhebliche Debatte ausgelöst mit Argumenten, dass die Emissionsbekämpfung alleine für die Steigerungen der Energiepreise verantwortlich sei. Was dabei in den hochpolitisierten Debatten häufig nicht erwähnt wird, ist das Alterna-

tivszenario, also was mit den Energiekosten passieren würde, wenn die Investitionen in emissionsarme Technologien nicht durch eine Kostenumlage unterstützt werden würden. Auch wenn die Konsequenzen dieser Alternativentwicklung schwer im Detail zu prognostizieren sind, ist es alles andere als unwahrscheinlich, dass KonsumentInnen in Zukunft erheblich mehr den global steigenden und stark schwankenden Preisen fossiler Energieträger ausgesetzt sein werden. Hier stellen sich generelle Fragen: In welchem Ausmaß sollen die Kosten eines Umbaus zu emissionsarmen Energiestrukturen an die EndnutzerInnen von Energie weitergeleitet werden? Einen höheren Anteil dieser Kosten anhand von sonstigen Steuereinnahmen zu decken, stellt eine politische Herausforderung dar. Es wäre allerdings eine fortschrittlichere Weise, den Umbau hin zu einer klimafreundlichen Gesellschaft so zu gestalten, dass dabei einige der negative Folgen für ärmere Konsumentenschichten eingrenzt werden (Watson, 2012).

Wenn die möglichen Auswirkungen von energiesparenden Maßnahmen (wie im Falle des „Green Deal") durchgeführt werden, müssen Regierungen alle Erkenntnisse zum Konsumentenverhalten berücksichtigen. Die moderne Ökonomie hat Marktversagen, asymmetrische Information und begrenzte Rationalität als Normalfälle in den Analyserahmen aufgenommen weshalb idealtypische Entscheidungen basierend auf einem umfassenden Wissen über Nutzen und Kosten nicht mehr angenommen wird. Ihre Entscheidungen werden darüber hinaus durch Gewohnheiten, Routinen, Daumenregeln oder Einflüsse außerhalb ihres Einflussbereichs geleitet, wodurch in der Praxis die Wahlmöglichkeiten begrenzt sind (Jackson, 2005).

Letztendlich wird es notwendig sein, neue Rollen für Individuen, Netzwerke und Gemeinschaften zu definieren, um Entwicklungspfade zu betreten, die uns in Richtung Nachhaltigkeit bringen. Gemeinschaftliche Energieverbünde haben zwar eine lange Geschichte in Österreich, in der gegenwärtigen Marktstruktur stellen sie aber eher Ausnahmen dar.

6.5 Schlussfolgerungen
6.5 Conclusions

Die präsentierte Evidenz verdeutlicht, dass kleinere oder mittelgroße Anpassungen der aktuellen Produktionsweise gekoppelt mit Umwelttechnologie nicht reichen werden um deutliche Beiträge zur THG-Reduktion zu erreichen. Dafür ist eine sozio-ökologische Transformation nötig. Diese erfordert entschiedenes klimaschützendes Handeln aller AkteurInnen und die Anpassung von Produktions- und Konsumpraktiken sowie klimaschützende Investitionsentscheidungen und politische Regulierungen. Von diesen komplementären Maßnahmen weisen tiefgreifende Verhaltensänderungen erhebliche Klimaschutzpotenziale auf und sind aufgrund der enormen Herausforderung, die durch technische Veränderungen alleine nicht zu bewältigen sind, nötig. Duchin und Lange (1994) zeigten bereits vor zwei Jahrzehnten, dass sogar bei weltweitem Einsatz sauberer und effizienter Technologie, die international vereinbarten Emissionsziele (damals: 1992 Rio de Janeiro UNCED) nicht erreichbar seien. Daraus schlossen sie, dass Nachfragereduktionen nötig sind, die Verwirklichung dieser sich aufgrund von Barrieren Konsummuster zu hinterfragen jedoch als schwierig gestalte. Haushalte werden nur eingeschränkt zu Verhaltensänderungen bereit sein, wenn Unternehmen und der Staat nicht ebenso klimaschützend tätig werden. Daher sind alle AkteurInnen gleichermaßen und energisch aufgefordert, ihr Verhalten zu ändern. Eine Transformation zu einem nachhaltigen Energiesystem bringt darüber hinaus auch positiven Begleitnutzen für die Österreichische Wirtschaft mit sich.

Als überdurchschnittlich wohlhabendes Land innerhalb der EU, das außerdem relativ großzügig mit erneuerbaren Energiepotenzialen ausgestattet ist, sollte Österreich entschiedene Schritte setzen und eine Vorreiterrolle übernehmen. Das heißt, in seinen Klimaschutzzielen für 2020 sollte sich Österreich zumindest an den ursprünglichen Kyoto-Zielen (–13 % Emissionen im Vergleich zu 1990) orientieren, wobei die Erreichbarkeit dieser Ziele durch die jüngste Wirtschaftskriese erleichtert wird.

In Österreich sind bereits gegenwärtig klare Änderungen in den Wertvorstellungen vieler Menschen festzustellen, die einer Transformation zuträglich sind. Einzelne PionierInnen des Wandels sind bereits dabei, diese Vorstellungen in klimafreundlichen Handlungs- und Geschäftsmodellen praktisch umzusetzen (z. B. Energiedienstleistungsgesellschaften im Immobilienbereich, klimafreundliche Mobilität, Nahversorgung). Um diese Initiativen zu intensivieren, sind begleitende Politikmaßnahmen erforderlich, die eine verlässliche Regulierungslandschaft schaffen.

Wichtige technologische Lernprozesse für eine Transformation zu einer klimaverträglichen Gesellschaft schreiten voran: Global betrugen z. B. die Investitionen in erneuerbare Energien (ohne große Wasserkraftprojekte) 2013 bereits 214 Mrd. US$. Die Preise besonders für Photovoltaik (PV) und Windkraftanlagen fallen nach wie vor dramatisch (z. B. PV in Deutschland minus 67 % seit 2006 von 5 100 auf 1 640 € / kW Peak). Dadurch erreicht Solarstrom etwa in Deutschland und Italien bereits Netzparität, kann also zum gleichen oder nied-

rigeren Preis von PrivatverbraucherInnen erzeugt werden als Haushalte bei einem Bezug aus dem Netz zahlen müssten. In Österreich ist eine Verstetigung des Regulierungsumfelds erforderlich um Investitionsrisiken zu reduzieren, technische Lernkurven und Preisreduktionen nachzuvollziehen und einen klimafreundlicheren Energiemix zu erreichen. Dadurch würde auch kleinen, kreativen und innovativen AkteurInnen (wie Kommunen, mittelständischen Unternehmen, Bürgerinitiativen, Privatpersonen) eine aktive Teilnahme am Energiemarkt ermöglicht.

Auch für die aus dem Ausland importierten Güter, die in Österreich konsumiert werden, lässt sich eine Klimaverantwortung beschreiben, die bisher oft vernachlässigt wird. Derzeit folgen die meisten Energie- / Emissionsmodelle nur den territorialen Systemgrenzen und bilanzieren für produzierende Aktivitäten in den verschiedenen Wirtschaftssektoren. Dabei vernachlässigen sie sogenannte indirekte, „graue" Emissionen, die in den Vorleistungsketten von importierten Gütern im Ausland erfolgt sind. Konsumseitig bilanzierende Modelle erfassen diese hingegen besser. Diese Modelle sind aber in der Regel weniger detailliert bezüglich der technologischen Optionen des Klimaschutzes, oder der Kosten. Klimaziele sollten sich an beiden, einander ergänzenden Kriterien der Klimaverantwortung orientieren (produktionsseitig und konsumseitig) und müssen so gewählt werden, dass dabei keine Auslagerung von Emissionen in Märkte erfolgt, die keine klimapolitische Regulierung aufweisen („carbon leakage").

Drei zentrale Transformationsfelder werden identifiziert auf die besonderes Augenmerk gelegt werden sollte, weil Fehlentwicklungen langfristige emissionsintensive Pfadabhängigkeiten schaffen und weil deren Dynamiken und Klimaeinfluss in modellbasierten Planungsstudien bisher unzureichend erfasst wird:

- Transformationen des Energiesystems an sich (gleichzeitiges verfolgen ambitionierter Energiesparpotenziale und rascher Ausbau erneuerbarer Energiequellen)
- Integrierte Entwicklungen im Bereich nachhaltiger Konsum- und Produktionssysteme

Synergiepotenziale von Städten und verdichteten Siedlungsräumen

In Österreich wurde eine Reihe von Initiativen zur Verbesserung der Energieeffizienz und zur Förderung erneuerbarer Energieträger vorgeschlagen und teilweise umgesetzt. So wurde etwa in der 2011 veröffentlichten Energiestrategie vorgeschlagen, den Endenergieverbrauch bis 2020 auf das Niveau von 2005 von 1 100 PJ zu reduzieren. Im Ökostromgesetz werden Ziele der Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen von zusätzlich 10,5 TWh / Jahr bis 2020 angegeben, zahlreiche bundes- und länderspezifische Maßnahmen bestehen zur Regulierung von Kleinverbrauche, Raumwärme und Warmwasser. Im Verkehrssektor gilt die Biokraftstoffverordnung und Gestaltung der Normverbrauchsabgabe bis jetzt als Maßnahme zum Klimaschutz und der Industrie- und Energiesektor ist weitgehend im Rahmen des europäischen Emissionshandelssystems reguliert. All diese Ziele reichen allerdings nicht über das Jahr 2020 hinaus und die anvisierten Ziele der Energiestrategie sind durch keine bindenden regulatorischen Maßnahmen verschränkt. Die Ausbauziele für erneuerbare Energieträger sind nicht ambitioniert und werden wahrscheinlich deutlich vor 2020 erreicht, während es unwahrscheinlich ist, dass im Industriesektor eine tatsächliche Trendwende der Emissionen erreicht wird. Die erwarteten Einsparungen von THG-Emissionen beim Ersatz fossiler Treibstoffe durch Biokraftstoffe werden durch Lebenszyklusstudien in Frage gestellt. Insgesamt ist es daher unwahrscheinlich, dass diese inkrementellen regulatorischen Maßnahmen, ausreichen um substantielle Beiträge zum Erreichen des 2 °C Ziels zu erreichen. Um auf einen nachhaltigen Entwicklungspfad umzulenken, ist eine sozio-ökologische Transformation erforderlich, die sich durch grundlegende Veränderungen der vorherrschenden Produktions-, Konsum- und Regulierungspraktiken auszeichnet.

6.5.1 Forschungsbedarf

Um der Herausforderung der Transformation des Energiesystems zur Klimaverträglichkeit und der dazu allgemein notwendigen gesellschaftlichen Veränderungen zu begegnen, sind Forschungsanstrengungen in zahlreichen Bereichen notwendig. Hier folgt eine Liste (ohne Anspruch auf Vollständigkeit), die zentrale Unsicherheiten und Datendefizite anspricht, die durch gezielte Forschungsprojekte (z. B. koordiniert von regionalen Energieagenturen) bearbeitet werden könnten:

- Methodisch harmonisierte, flächendeckende sowie räumlich und zeitlich detaillierte Karten der Energienachfrage (z. B. Wärmebedarfkataster[4]) um Synergiepotenziale (z. B. für kaskadische Nutzung von Energie in Kraft-Wärmekopplungen, Heiz- und Kühlnetzwerke) erkennen zu können.

[4] http://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/stadtvermessung/geodaten/solar/

- Methodische Herausforderungen für die Berechnung sowohl direkter als auch indirekter Emissionsverantwortung auf nationaler und subnationaler Ebene (z. B. für Städte und Gemeinden).
- Entsprechende Datensätze zu den physikalischen, technischen, ökonomischen und nachhaltigen Potenzialen erneuerbarer Energieträger (z. B. Solarpotenzialkataster[5], vgl. Stanzer et al., 2010) sowie kontinuierlich aktualisierte Datenbanken zur Kostenentwicklung dieser Technologien und Szenarien unter unterschiedlichen Fördervarianten. (Öffentliche Förderungen können dabei an Auflagen zur kontinuierlichen Berichterstattung und Kostentransparenz bestehender Projekte geknüpft werden.)
- Ausweitung der Transformationsforschung inklusive systematischer Vergleiche der Resultate von Modellen und Energie- und Emissionszenarien, Benchmarking und „Multi-Modell Vergleichsworkshops", Analyse der Resultate von Szenario-Ensembles.
- Mögliche Bedeutung, potentiell disruptiver Technologien für die Energiewende, wie speicherintegrierte Elektromobilität, supraleitende transeuropäische Gleichstromnetze, Innovationen in der Nachfrage wie z. B. Energiedienstleistungsfirmen, Mobilitätsdienstleistungen.
- Barrieren gegenüber Verbesserungen der Energieeffizienz, inklusive Möglichkeiten, den nach wie vor wachsenden Elektrizitätsbedarf (z. B. durch Unterhaltungselektronik, IT / online-Netzwerkgeräte etc.) einzugrenzen.
- Räumliche Aspekte der Wertschöpfungskette erneuerbarer Technologien „Jobs in die Fläche bringen".
- Risiken des Rebound-Effekts, bei dem Emissionseinsparungen durch Fortschritte in der Energieeffizienz (und dadurch wachsende Haushaltseinkommen) durch Verhaltensänderungen (z. B. zusätzliche Fernurlaube in Übersee) kompensiert werden.
- Fragen zur industriellen Ökologie konventioneller Energieträger (z. B. vorgelagerte Übertragungsverluste in Pipelines beim Gasimport, Umwelteffekte von Petroleumerzeugung und Importen, insbesondere bei der Förderung aus „unkonventionellen Lagerstätten" etc.), sowie von erneuerbaren Energieträgern (Auswirkung von weiterem Wasserkraftausbau auf Gewässerökologie, Biomasseausbau und Auswirkung auf Biodiversität, Böden, Nährstoffbilanzen, Erosion, Wasserhaushalt, Nahrungsmittelerzeugung und Preise, Auswirkung von Windrädern auf Vögel, Fledermäuse, Geothermie und seismische Aktivität und mögliche Einflüsse auf Grundwasserqualität etc.).

[5] http://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/stadtvermessung/geodaten/solar/

- Fragen der öffentlichen Akzeptanz, z. B. von Smart-Grid Technologie und allgegenwärtiger Fernerkundung („ubiquitous sensing").
- Die Analyse, Entwicklung und Gestaltung politisch, ökonomisch und ökologisch wirksamer Instrumente und Maßnahmen, die auf die konsumbasiert bilanzierten Emissionen wirken; das heißt ganz gezielt global und effektiv die THG-Emissionen senken, sowie die Analyse ihrer Wirkungen (z. B. auf die Einkommensverteilung).
- Kosteneffekte und Sozialverträglichkeit verschiedener Förderungssysteme für erneuerbare Energiequellen (vgl. WGBU, 2014). Die Diskussion um wirtschaftspolitische Instrumente Eingriffe in Bezug auf Erneuerbare Energien wird oft kontrovers geführt und gelangt zu keinen einheitlichen Schlussfolgerungen (vgl. z. B. Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung SBGES, 2013). Eine Ursache sind die zu Grunde liegenden Forschungsansätze. Ökonomische Modelle sind in der Regel von Effizienzüberlegungen getrieben und treffen dazu bestimmte Annahmen (Rationalität, perfekte Information, keine Transaktionskosten), die in der Realität so jedoch oft nicht gegeben sind. Deshalb lässt sich rationales Verhalten oft in empirischen Untersuchungen von Politikeingriffen oft auch nicht beobachten, so dass die aus diesen gewonnen Einsichten zu „best practices" oft nicht dem ökonomischen Ideal entsprechen. Ein Grund dafür ist unter Anderem., dass Verteilungswirkungen zwischen Akteuren in der reinen Effizienzdiskussion oft nicht berücksichtigt werden. Forschung in diesem Bereich soll dazu beitragen einen einheitlicheren Ansatz zu entwickeln, der auf Erkenntnisse aus beiden Forschungsansätzen zurückgreift.
- Die Einrichtung eines neuen Forschungsfeldes „Transformationsforschung", das Transformationsprozesse und die gesellschaftlichen Voraussetzungen im Rahmen planetarischer Leitplanken untersucht (nach dem Vorschlag der WGBU, 2011). Der Umbau der Energieversorgung eingebettet in einen gesellschaftlichen Transformationsprozess impliziert die Entwicklung von neuen gesellschaftlichen Strukturen und den Wandel von Lebensstilen. Diese werden eingeführt von PionierInnen des Wandels („Change Agents"). Transformationsforschung sollte aufzeigen wie Strukturen geschaffen werden können, welche die Generierung und Diffundierung sozialer Innovationen ermöglichen.
- Bildung für Transformation sollte größere Bedeutung in der Nachhaltigkeitsstrategie erhalten. Bildung ist eine notwendige Voraussetzung für den Erfolg der Trans-

formation. Durch Bildung in unterschiedlichsten und vielfältigen Strukturen und über neu aufzuarbeitende Bildungsinhalte kann die Gesellschaft die erforderlichen Kompetenzen für die aktive Beteiligung am Transformationsprozess erlangen (Muttarak and Lutz, 2014). Zum Beispiel, die Einrichtung von Low-carbon Business Schools sowie interdisziplinärer Fakultäten für klimaverträgliche Landnutzung, Energiewissenschaft, Urbanisierung und für Management, welches auf die Transformation ausgerichtet ist, könnten wichtige Impulse liefern (WGBU, 2011).

6.6 Literaturverzeichnis
6.6 References

Ahmad, N., Wyckoff, A., 2003. Carbon Dioxide Emissions Embodied in International Trade of Goods (OECD Science, Technology and Industry Working Papers No. 2003/15).

Anderl, M., Bednar, W., Gössl, M., Haider, S., Heller, C., Jobstmann, H., Köther, T., Lampert, C., Pazdernik, K., Pouper, S., Rigler, E., Schieder, W., Schindlbacher, S., Schmid, C., Schneider, J., Schmid-Ruzicka, S., Seuss, K., Stranner, G., Storch, A., Weiss, P., Wiesenberger, H., Winter, R., Zechmeister, A., Zethner, G., Kommunalkredit Public Consulting GmbH, 2013. Klimaschutzbericht 2013 (REP-0420). Umweltbundesamt, Wien.

Anderl, M., Freudenschuß, A., Haider, S., Jobstmann, H., Köther, T., Kriech, M., Lampert, C., Moosmann, L., Pazdernik, K., Pinterits, M., Poupa, S., Schmid, C., Stranner, G., Kohlbach, M., Schwaiger, E., Schwarzl, B., Weiss, P., Zechmeister, A., 2014. Austria´s National Inventory Report 2014 (Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and under the Kyoto Protocol; REP-0475). Umweltbundesamt, Wien.

ARBÖ, 2013. Spritpreise europaweit [WWW Document]. URL http://www.arboe.at/services-reisen/reisen/spritpreise-europaweit/ (accessed 7.14.14).

Ayres, R.U., 1977. Resources, environment, and economics. Applications of the materials/energy balance principle. John Wiley & Sons Inc, United States.

Bliem, M., Friedl, B., Balabanov, T., Zielinska, I., 2011. Energie [R]evolution Österreich 2050. Der Weg zu einer sauberen Energie-Zukunft in Österreich (Projektbericht; Studie im Auftrag von EVN, Greenpeace Zentral- und Osteuropa und Gewerkschaft vida). Institut für Höhere Studien (IHS), Wien.

BMLFUW, 2004. Abschätzung der Auswirkungen des Tanktourismus auf den Treibstoffverbrauch und die Entwicklung der CO_2-Emissionen in Österreich (Endbericht). Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.

BMFLUW, 2007. Anpassung der Klimastrategie Österreichs zur Erreichung des Kyoto-Ziels 2008-2013 (Vorlage zur Annahme im Ministerrat am 21. März 2007). Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.

BMWFJ, 2013. Energiestatus 2013 (Entwicklung bis 2011). Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, Wien.

Bointner, R., Biermayer, P., Goers, S., Streit-Maier, J., Tichler, R., 2013. Wirtschaftskraft erneuerbarer Energie in Österreich und erneuerbare Energie in Zahlen (Blue Globe Report - Wirtschaftsfaktor Erneuerbare Energie 1/2013). Klima und Energiefonds, Bundesministerium für Land- und Fortswirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW), Wien.

Brand, U., 2009. Die Multiple Krise. Dynamik und Zusammenhang der Krisendimensionen, Anforderungen an politische Institutionen und Chancen progressiver Politik. Heinrich Böll Stiftung, Berlin.

Brand, U., 2012. Green Economy – the next Oxymoron? No lessons learned from failures of implementing sustainable development. GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society 21, 28–32.

Brand, U., Görg, C., 2013. Regimes in global environmental governance and the internationalization of the state: The case of biodiversity politics. International Journal of Social Science Studies 1, 110–122. doi:10.11114/ijsss.v1i1.75

Brand, U., Wissen, M., 2011. Die Regulation der ökologischen Krise: Theorie und Empirie der Transformation gesellschaftlicher Naturverhältnisse. Österreichische Zeitschrift für Soziologie 36, 12–34. doi:10.1007/s11614-011-0031-1

Carbon Tracker, 2013. Unburnable carbon - Are the world's financial markets carrying a carbon bubble? Carbon Tracker Initiative.

Carbon Trust, 2006. The carbon emissions generated in all that we consume. The Carbon Trust, UK.

CDP, 2013. Driving sustainable economies [WWW Document]. URL https://www.cdp.net/en-US/Pages/HomePage.aspx (accessed 7.17.14).

Chapin, F.S., Kofinas, G.P., Folke, C. (Eds.), 2009. Principles of ecosystem stewardship: Resilience-based natural resource management in a changing world. Springer, Berlin.

Chapin, F.S., Carpenter, S.R., Kofinas, G.P., Folke, C., Abel, N., Clark, W.C., Olsson, P., Smith, D.M.S., Walker, B., Young, O.R., Berkes, F., Biggs, R., Grove, J.M., Naylor, R.L., Pinkerton, E., Steffen, W., Swanson, F.J., 2010. Ecosystem stewardship: Sustainability strategies for a rapidly changing planet. Trends in Ecology & Evolution 25, 241–249. doi:10.1016/j.tree.2009.10.008

Christian, R., 2011. ZEFÖ - Zukunftsfähige Energieversorgung für Österreich (KLIEN Projekt im Rahmen der Ausschreibung „Energiesysteme der Zukunft" des BMVIT). Umweltmanagement Austria, Institut für industrielle Ökologie und Forum Wissenschaft & Umwelt.

Coyle, D., 2011. The economics of enough: How to run the economy as if the future matters. Princeton University Press, Princeton.

Daly, H.E., 1977. Steady-state economics: The economics of biophysical equilibrium and moral growth. W. H. Freeman, San Francisco.

Diekmann, J., 2012. EU-Emissionshandel: Anpassungsbedarf des Caps als Reaktion auf externe Schocks und unterwartete Entwicklungen? (Arbeitspapier aus dem Forschungs- und Entwicklungsvorhaben „Evaluierung und Weiterentwicklung des EU-Emissionshandels EU-ETS-5"). Umweltbundesamt, Dessau.

Duchin, F., Lange, G.-M. (Eds.), 1994. The Future of the environment: Ecological economics and technological change. Oxford University Press, New York.

EC, 2009. Communication from the Commission to the Council and the European Parliament: GDP and beyond: Measuring progress in a changing world. (COM(2009) 433 final). Commission of the European Communities (CEC), Brussels.

Edenhofer, O., Lessmann, K., Kemfert, C., Grubb, M., Kohler, J., 2006. Induced technological change: Exploring its implications for the economics of atmospheric stabilization: Synthesis report from the innovation modeling comparison project. The Energy Journal 57–107.

EEA - European Environment Agency, 2012a. Environmental Indicator Report 2012. European Envirionment Agency, Copenhagen.

EEA - European Environment Agency, 2012b. Greenhouse gas emission trends and projections in Europe 2012 - Tracking progress towards Kyoto and 2020 targets (EEA Report No 6/2012). EEA, Luxembourg.

EFI - Expertenkommission Forschung und Innovation, 2013. Gutachten zur Forschung, Innovation und technologischer Leistungsfähigkeit. Berlin.

Erb, K.-H., Gingrich, S., Krausmann, F., Haberl, H., 2008. Industrialization, fossil fuels, and the transformation of land use. Journal of Industrial Ecology 12, 686–703. doi:10.1111/j.1530-9290.2008.00076.x

EU, 2009. Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG, L 140/16.

Europäische Kommission, 2011. Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen: Fahrplan für den Übergang zu einer wettbewerbsfähigen CO_2-armen Wirtschaft bis 2050 (KOM(2011) 112 endgültig). Europäische Kommission, Brüssel.

European Climate Foundation, 2010. Roadmap 2050 [WWW Document]. URL http://www.roadmap2050.eu/project/roadmap-2050 (accessed 7.16.14).

European Climate Foundation, 2011. Power Perspektives 2030. On the road to a decarbonized power sector. European Climate Foundation, Brussels.

European Report on Development, 2013. Post-2015: Global Action for an Inclusive and Sustainable Future. Overseas Development Institute (ODI), German Development Institute/Deutsches Institut für Entwicklungspolitik (DIE), European Centre for Development Policy Management (ECDPM), Brussels.

Falkner, R., 2013. The crisis of environmental multilateralism: A liberal response, in: Brack, D., Burall, P., Stockley, N., Tuffrey, M. (Eds.), The green book. New directions for Liberals in government. Biteback Publishing, London, UK, pp. 347–358.

Falkner, R., Stephan, H., Vogler, J., 2010. International climate policy after Copenhagen: Towards a „Building Blocks“ approach. Global Policy 1, 252–262. doi:10.1111/j.1758-5899.2010.00045.x

Folke, C., Carpenter, S.R., Walker, B., Scheffer, M., Chapin, T., Rockström, J., 2010. Resilience thinking: Integrating resilience, adaptability and transformability. Ecology and Society 15, 20.

GEA, 2012. Global Energy Assessment - toward a sustainable future. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.

Goldin, I., 2013. Divided nations: Why global governance is failing, and what we can do about it, 21st century challenges. Oxford University Press, Oxford.

Greenpeace International, 2005. Energy [R]evolution 2005: A sustainable pathway to a clean energy future for Europe. Greenpeace International, Amsterdam.

Greenpeace International, 2011. Battle of the grids. Amsterdam.

Greenpeace International, 2012. Energy [R]evolution 2012. Greenpeace International, Amsterdam.

Grossman, G.M., Krueger, A.B., 1995. Economic Growth and the Environment. Quarterly Journal of Economics 110, 353–377.

Growth in Transition, 2012. Conference 2012 [WWW Document]. URL http://www.growthintransition.eu/conferences/conference2012/workshops/ (accessed 7.16.14).

Gunderson, L.H., Holling, C.S. (Eds.), 2002. Panarchy: understanding transformations in human and natural systems. Island Press, Washington, DC.

Haas, R., Kranzl, L., Müller, A., Corradini, R., Zotz, M., Frankl, P., Menichetti, E., 2008. Szenarien der gesamtwirtschaftlichen Marktchancen verschiedener Technologielinien im Energiebereich, 2. Ausschreibung der Programmlinie Energiesysteme der Zukunft (BMVIT). Energy Economics Group ,TU Wien, Wien.

Heller, C., Gallauner, T., Fallmann, H., Krutzler, T., Wiesenberger, H., Seuss, K., Storch, A., Stranner, G., Zechmeister, A., Schindler, I., 2011. Ambitionierte Klimaziele Bis 2020 - Analyse und Auswirkungen auf Österreich (REP-0336). Umweltbundesamt, Wien.

Hinterberger, F., Ökonomischer Wachstumsdialog, 2009. Ökonomische Zweifel am „Grünen Wachstum“. Der Standard.

Hirth, L., Ueckerdt, F., 2013. Redistribution effects of energy and climate policy: The electricity market. Energy Policy 62, 934–947. doi:10.1016/j.enpol.2013.07.055

International Energy Agency, 2012. CO2 emissions from fuel combustion. 2012 Edition. OECD/IEA, Paris, France

International Energy Agency, 2013. Energy efficiency market report 2013: Market trends and medium-term prospects. OECD/IEA, Paris, France.

International Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development, 2008. Austria 2007 Review, Energy Policies of IEA Countries. OECD/IEA, Paris.

IPCC, 2012. Glossary of terms, in: Field, C.B., Barros, V., Stocker, T.F., Quin, D., Dokken, D.J., Ebi, K.L., Mastrandrea, M.D., Match, K.J., Plattner, G.-K., Allen, S.K., Tignor, M., Midgley, P.M. (Eds.), Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation, A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 555–564.

IPCC, 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M.(eds). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC, 2014a. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC, 2014b. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC, 2007. Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland.

Jackson, T., 2005. Motivating Sustainable Consumption, a review of evidence on consumer behaviour and behavioural change (report to the Sustainable Development Research Network). Centre for Environmental Strategy, University of Surrey, Guildford, Surrey.

Jackson, T., 2009. Prosperity without growth: Economics for a finite planet. Earthscan, London; Sterling, VA.

Jackson, T., Victor, P., 2011. Productivity and work in the „green economy": Some theoretical reflections and empirical tests. Environmental Innovation and Societal Transitions 1, 101–108. doi:10.1016/j.eist.2011.04.005

Jakob, M., Steckel, J.C., Edenhofer, O., 2014. Consumption- Versus Production-Based Emission Policies. Annual Review of Resource Economics 6. doi:10.1146/annurev-resource-100913-012342

Kratena, K., Meyer, I., 2011. Energy Scenarios 2030. A basis for the projection of Austrian greenhouse gas emissions. Austrian Institute of Economic Research (WIFO), Vienna.

Kratena, K., Meyer, I., Würger, M., 2009. Ökonomische, technologische und soziodemographische Einflussfaktoren der Energienachfrage (Unveröffentlichter Entwurf), WIFO Working Paper 339/2009. Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung, Wien.

Krausmann, F., 2006. Forest transition in Austria: A socio-ecological approach. Mitteilungen der Österreichischen Geographischen Gesellschaft 148, 75–91.

Krausmann, F., Schandl, H., Sieferle, R.P., 2008. Socio-ecological regime transitions in Austria and the United Kingdom. Ecological Economics 65, 187–201. doi:10.1016/j.ecolecon.2007.06.009

Kriegler, E., Weyant, J.P., Blanford, G.J., Krey, V., Clarke, L., Edmonds, J., Fawcett, A., Luderer, G., Riahi, K., Richels, R., Rose, S.K., Tavoni, M., van Vuuren, D.P., 2014. The role of technology for achieving climate policy objectives: Overview of the EMF 27 study on global technology and climate policy strategies. Climatic Change 123, 353–367. doi:10.1007/s10584-013-0953-7

Kuznets, S., 1955. Economic growth and income inequality. The American Economic Review 45, 1–28.

Leach, M., Rockström, J., Raskin, P., Scoones, I., Stirling, A.C., Smith, A., Thompson, J., Millstone, E., Ely, A., Arond, E., Folke, C., Olsson, P., 2012. Transforming innovation for sustainability. Ecology and Society 17. doi:10.5751/ES-04933-170211

Lindner, S., Liu, Z., Guan, D., Geng, Y., Li, X., 2013. CO_2 emissions from China's power sector at the provincial level: Consumption versus production perspectives. Renewable and Sustainable Energy Reviews 19, 164–172. doi:10.1016/j.rser.2012.10.050

Littig, B., Griessler, E., 2005. Social sustainability: A catchword between political pragmatism and social theory. International Journal of Sustainable Development 8, 65–79.

Madlener, R., Albott, B., 2011. Herausforderungen für eine technisch-ökonomische Entkoppelung von Naturverbrauch und Wirtschaftswachstum unter besonderer Berücksichtigung der Systematisierung von Rebound-Effekten und Problemverschiebungen. Im Auftrag von: Enquete-Kommission „Wachstum, Lebensqualität" des Deutschen Bundestages, Zürich.

McGranahan, G., Jacobi, P., Songsore, J., 2001. The Citizens at Risk: From urban sanitation to sustainable cities. Earthscan, London; Sterling, VA.

Mechler, R., Rezai, A., Stagl, S., 2010. Is green growth feasible? Some reflections and implications for Austria. Wirtschaftspolitische Blätter, Wachstum und Nachhaltigkeit 2010.

Mills, J.H., Waite, T.A., 2009. Economic prosperity, biodiversity conservation, and the environmental Kuznets Curve. Ecological Economics 68, 2087–2095. doi:10.1016/j.ecolecon.2009.01.017

Mishan, E.J. and Mishan, E.J., 1967. The costs of economic growth. F.A. Praeger, New York.

Moon, T.H. 2010. Green growth policy in the Republic of Korea: Its promise and pitfalls. Korea Observer 41 (3): 379-414.

Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., van Vuuren, D.P., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G.A., Mitchell, J.F.B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.J., Stouffer, R.J., Thomson, A.M., Weyant, J.P., Wilbanks, T.J., 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. Nature 463, 747–756. doi:10.1038/nature08823

Muñoz, P., Steininger, K.W., 2010. Austria's CO_2 responsibility and the carbon content of its international trade. Ecological Economics 69, 2003–2019. doi:10.1016/j.ecolecon.2010.05.017

Muttarak, R., Lutz, W., 2014. Is Education a Key to Reducing Vulnerability to Natural Disasters and hence Unavoidable Climate Change? Ecology and Society 19. doi:10.5751/ES-06476-190142

Nakano, S., Okamura, A., Sakurai, N., Suzuki, M., Tojo, Y., Yamano, N., 2009. The Measurement of CO2 Embodiments in International Trade (OECD Science, Technology and Industry Working Papers 2009/03). Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris.

OECD, 2011. Compendium of OECD well-being indicators, OECD Better Life - Initiative. Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris.

OECD, 2013. Carbon Dioxide Emissions Embodied in International Trade [WWW Document]. Industry and globalisation. URL http://www.oecd.org/sti/ind/carbondioxideemissionsembodiedininternationaltrade.htm (accessed 7.16.14).

ÖSG, 2012. Bundesgesetz über die Förderung der Elektrizitätserzeugung aus erneuerbaren Energieträgern (Ökostromgesetz 2012 – ÖSG 2012) StF: BGBl. I Nr. 75/2011 (NR: GP XXIV RV 1223 AB 1302 S. 113. BR: 8521 AB 8532 S. 799).

ÖSTAT, 2011. Statistik der Zivilluftfahrt 2010. Statistik Austria, Wien.

Peters, G.P., Hertwich, E.G., 2008. Post-Kyoto greenhouse gas inventories: production versus consumption. Climatic Change 86, 51–66. doi:10.1007/s10584-007-9280-1

Raingold, A., 2011. Greening the Economy. A strategy for growth, jobs and success. Aldersgate Group, London.

REN21, 2014. Renewables 2014. Global Status Report. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, Paris.

Renner, S., Baumann, M., Jamek, A., Lang, B., Pfaffenbichler, P., 2010. Visionen 2050 – Identifikation von existierenden und möglichen zukünftigen Treibern des Stromverbrauchs und von strukturellen Veränderungen bei der Stromnachfrage in Österreich bis 2050 (Endbericht). Österreichische Energieagentur i.A. Österreichs Energie (VEÖ), Wien.

Rezai, A., Taylor, L., Mechler, R., 2013. Ecological macroeconomics: An application to climate change. Ecological Economics, New Climate Economics 85, 69–76. doi:10.1016/j.ecolecon.2012.10.008

Riahi, K., Dentener, F., Gielen, D., Grubler, A., Jewell, J., Klimont, Z., Krey, V., McCollum, D., Pachauri, S., Rao, S., van Ruijven, B., van Vuuren, D.P., Wilson, C., 2012. Chapter 17 - Energy Pathways for Sustainable Development, in: Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, pp. 1203–1306.

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F.S., Lambin, E.F., Lenton, T.M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H.J., Nykvist, B., de Wit, C.A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P.K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R.W., Fabry, V.J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P., Foley,

J.A., 2009. A safe operating space for humanity. Nature 461, 472–475. doi:10.1038/461472a

Sabatier, P.A., 1986. Top-down and bottom-up approaches to implementation research: a Critical analysis and suggested synthesis. Journal of Public Policy 6, 21–48. doi:10.1017/S0143814X00003846

SBGES – Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung, 2013. Gegen eine rückwärtsgewandte Wirtschaftspolitik, Jahresgutachten. Bonifatius GmbH Buch-Druck-Verlag, Paderborn.

Schächtele, K., Hertle, H., 2007. Die CO_2 Bilanz des Bürgers. Recherche für ein internetbasiertes Tool zur Erstellung persönlicher CO_2 Bilanzen. Umweltbundesamt, Heidelberg.

Scheffer, M., Westley, F., Brock, W.A., Holmgreen, M., 2002. Dynamic interaction of societies and ecosystem-linking theories from ecology, economy and sociology, in: Gunderson, L.H., Holling, C.S. (Eds.), Panarchy: Understanding transformations in human and natural systems. Island Press, Washington, DC.

Scoones, I., Leach, M., Stagl, S., Stirling, A., Thompson, J., 2007. Dynamic Systems and the Challenge of Sustainability, STEPS Working Paper. STEPS Centre, Brighton.

Scrieciu, S., Rezai, A., Mechler, R., 2013. On the economic foundations of green growth discourses: the case of climate change mitigation and macroeconomic dynamics in economic modeling. WENE 2, 251–268. doi:10.1002/wene.57

Seidl, I., Zahrnt, A., 2010. Postwachstumsgesellschaft: Konzepte für die Zukunft. Metropolis, Marburg.

Sensfuß, F., Ragwitz, M., Genoese, M., 2008. The merit-order effect: A detailed analysis of the price effect of renewable electricity generation on spot market prices in Germany. Energy Policy 36, 3086–3094. doi:10.1016/j.enpol.2008.03.035

SERI - Sustainable Europe Research Institute, 2011. KONSENS (KonsumentInnen und Energiesparmaßnahmen) Briefing Sheet. Nachhaltigkeitsforschungs und -kommunikations GmbH, Wien.

Sinn, H.-W., 2012. The green paradox: a supply-side approach to global warming. MIT Press, Cambridge, Massachusetts; London, UK.

Sorrell, S., Dimitropoulos, J., 2008. The rebound effect: Microeconomic definitions, limitations and extensions. Ecological Economics 65, 636–649. doi:10.1016/j.ecolecon.2007.08.013

Stagl, S., 1999. Delinking economic growth from environmental degradation? A literature survey on the environmental Kuznets Curve hypothesis. Wirtschafts Universitat Wien Working Paper No. 6. doi:10.2139/ssrn.223869

Stanzer, G., Novak, S., Dumke, H., Plha, S., Schaffer, H., Breinesberger, J., Spanring, C., Kirtz, M., Biermayer, P., 2010. REGIO Energy. Regionale Szenarien erneuerbarer Energiepotenziale in den Jahren 2012/2020. Österreichisches Institut für Raumplanung (ÖIR), mecca environmental consulting, AGRAR PLUS Beteiligungs-GmbH, TU Wien, Department of Power Systems and Energy Economics, Energy Economics Group (EEG), im Auftrag des BMVIT, Sektion Innovation und Telekommunikation und BMWA, Sektion Wirtschaftspolitik, Wien, St. Pölten.

Steinberger, J.K., Krausmann, F., Eisenmenger, N., 2010. Global patterns of materials use: A socioeconomic and geophysical analysis. Ecological Economics 69, 1148–1158. doi:10.1016/j.ecolecon.2009.12.009

Steininger, K., Lininger, C., Droege, S., Roser, D., Tomlinson, L., Meyer, L., 2014. Justice and cost effectiveness of consumption-based versus production-based approaches in the case of unilateral climate policies. Global Environmental Change 24, 75–87. doi:10.1016/j.gloenvcha.2013.10.005

Stern, D.I., 2004. The rise and fall of the environmental Kuznets Curve. World Development 32, 1419–1439. doi:10.1016/j.worlddev.2004.03.004

Stern, D.I., Common, M.S., 2001. Is there an environmental Kuznets Curve for sulfur? Journal of Environmental Economics and Management 41, 162–178. doi:10.1006/jeem.2000.1132

Stern, D.I., Common, M.S., Barbier, E.B., 1996. Economic growth and environmental degradation: The environmental Kuznets Curve and sustainable development. World Development 24, 1151–1160. doi:10.1016/0305-750X(96)00032-0

Stiglitz, J.E., Sen, A., Fitoussi, J.-P., 2009. Report of the comission. Commission on the Measurement of Economic Performance and Social Progress, Paris.

Strauss, F., 2012. Modeling climate change and impacts on crop production in Austria. University of Natural Resources and Life Science, Vienna.

Strauss, F., Formayer, H., Asamer, V., Schmid, E., 2010. Climate change data for Austria and the period 2008-2040 with one day and km^2 resolution (Diskussionspapier DP - 48 - 2010). Institut für nachhaltige Wirtschaftsentwicklung, Universität für Bodenkultur, Wien.

Streicher, W., Haas, R., Hausberger, S., Oblasser, S., Schnitzer, H., Steininger, K.W., Tatzber, F., Titz, M., Heimrath, R., Kalt, G., Damm, A., Wetz, I., 2010. Energieautarkie für Österreich 2050 (Feasibility Study, Endbericht B068644, abgewickelt über den Klima- und Energiefonds.). im Auftrag des österreichischen Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (Lebensministerium), Wien.

Torras, M., Boyce, J.K., 1998. Income, inequality, and pollution: a reassessment of the environmental Kuznets Curve. Ecological Economics 25, 147–160. doi:10.1016/S0921-8009(97)00177-8

Trattnigg, R., 2012. The growth debate, revisited, in: Hinterberger, F., Pirgmaier, E., Freitag, E., Schuster, M. (Eds.), Growth in Transition. Earthscan, London.

UN DESA & UNDP, 2012. Synthesis of National Reports for RIO +20. United Nations Department of Economic and Social Affairs and the United Nations Development Programme.

Van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G.C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S.J., Rose, S.K., 2011. The representative concentration pathways: an overview. Climatic Change 109, 5–31. doi:10.1007/s10584-011-0148-z

Van Vuuren, D., Nakicenovic, N., Riahi, K., Brew-Hammond, A., Kammen, D., Modi, V., Nilsson, M., Smith, K., 2012. An energy vision: the transformation towards sustainability - interconnected challenges and solutions. Current Opinion in Environmental Sustainability, Open issue 4, 18–34. doi:10.1016/j.cosust.2012.01.004

VCÖ, 2012. Steuerbegünstigung von Diesel verringerte im Vorjahr Steuereinnahmen um rund 500 Millionen Euro! Presseaussendung 15.01.20112 [WWW Document]. URL http://www.vcoe.at/de/presse/aussendungen-archiv/details/items/Ausgabe2012-09 (accessed 7.16.14).

Victor, P.A., 2008. Managing without growth: slower by design, not disaster. Edward Elgar Publishing, Cheltenham.

Victor, P.A., 2012. Growth, degrowth and climate change: A scenario analysis. Ecological Economics, The Economics of Degrowth 84, 206–212. doi:10.1016/j.ecolecon.2011.04.013

Voß, J.-P., Kemp, R., 2005. Reflexive Governance: Learning to cope with fundamental limitations in steering sustainable development.

Voß, J.-P., Bauknecht, D., Kemp, R., 2006. Reflexive Governance for Sustainable Development. Edward Elgar Publishing, Cheltenham.

Walker, B., Holling, C.S., Carpenter, S.R., Kinzig, A., 2004. Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems. Ecology and Society 9.

Watson, J., 2012. Climate change policy and the transition to a low-carbon economy, in: Dolphin, T., Nash, D. (Eds.), Complex New World: Translating New Economic Thinking into Public Policy. Institute for Public Policy Research (IPPR), London, pp. 95-108.

WBGU, 2009. Kassensturz für den Weltklimavertrag - der Budgetansatz (Sondergutachten). Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, Berlin.

WBGU, 2011. Welt im Wandel: Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation. Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, Berlin.

WBGU, 2014. Klimaschutz als Weltbürgerbewegung. German Advisory Council on Global Change (WBGU) Secretariat, Berlin. (forthcoming)

Weitzman, M.L., 1974. Prices vs. Quantities. The review of economic studies 41, 477–491. doi:10.2307/2296698

Weizsäcker, E. von, Hargroves, K., Smith, M.H., Desha, C., Stasinopoulos, P., 2009. Factor five: Transforming the global economy through 80 % improvements in resource productivity. Taylor & Francis Ltd., London; Sterling, VA.

Weyant, J., Knopf, B., De Cian, E., Keppo, I., van Vuuren, D.P., 2013. Introduction to the EMF28 Study on scenarios for transforming the European energy system. Climate Change Economics 04, 1302001. doi:10.1142/S2010007813020016

Wolter, M.I., Großmann, A., Stocker, A., Polzin, C., 2011. Auswirkungen von energiepolitischen Maßnahmen auf Wirtschaft, Energiesystem und private Haushalte. Beschreibung der KONSENS-Modellierungsergebnisse (Working Paper Nr. 4 des Projekts KONSENS), KonsumentInnen und Energiesparmaßnahmen: Modellierung von Auswirkungen energiepolitischer Maßnahmen auf KonsumentInnen. SERI Nachhaltigkeitsforschungs und -kommunikations GmbH und Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschuiung mbH, Wien, Osnabrück.

World Bank, 2012. Inclusive green growth: the pathway to sustainable development. World Bank, Washington, D.C.

WWF UK, 2006. Counting Consumption- CO_2 Emissions, Material Flows and Ecological Footprint of the UK by Region and Devolved Country. WWF UK, Godalming, Surrey.



Anhang 1 – Akronyme und Abkürzungen

Anhang 2 – Verzeichnis des Wissenschaftlichen Beirates, der Review EditorInnen, der ReviewerInnen und der AutorInnen

Anhang 3 – Zitierweisen

Anhang 1: Akronyme und Abkürzungen

A1B, A1, A2, B1, B2 IPCC – SRES (Speical Report on Emissions Scenarios) Treibhausgasemissionsszenarien

AAR14 Austrian Assessment Report 2014

ACEA European Automobile Manufacturers Association

ACQWA Assessing Climate impacts on the Quantity and Quality of Water (EU FP7 Forschungsprojekt)

ACR Adaptation through Climate Resilience

ACRE Atmospheric Circulation Reconstruction over the Earth

ACRP Austrian Climate Research Programme des KLIEN

ACTRIS Aerosols, Clouds, and Trace gases Research Infra-Structure Network

AEA Österreichische Energieagentur

AGES Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit

AGU American Geophysical Union

AIM Asia-Pacific Integrated Model

AIT Austrian Institute of Technology

ALADIN Regionales Klimamodell, entwickelt von Meteo France

ALDIS Austrian Lightning Detection & Information System

ALOCLIM Austrian Long-Term Climate 1767–2000: Homogenisierte Beobachtungsdaten von Österreich

ALP-IMP Multi-centennial climate variability in the Alps based on Instrumental data, Model simulations and Proxy data (EU FP5 Forschungsprojekt)

AlpinRiskGP Abschätzung des derzeitigen und zukünftigen Gefährdungspotenzials für Alpintouristen und Infrastruktur, bedingt durch Gletscherrückgang und Permafrostveränderung im Großglockner-Pasterzengebiet (StartClim Projekt)

ALTETR Alternative Energieträger der Zukunft (Forschungsprojekt)

AMA Agrarmarkt Austria

AMO Atlantic Multidecadal Oscillation

AMOC Atlantic Meridional Overturing Circulation

AOGCM Atmosphere-Ocean General Circulation Model

ARAD Austrian Radiation – Projekt zur langfristigen Messung der Sonnenstrahlung und der Wärmestrahlung der Atmosphäre in Österreich

ARE Schweizer Bundesamt für Raumentwicklung

ARGE Arbeitsgemeinschaft

ARGO Array for Real-Time Geostrophic Oceanography

ARPEGE Globales Klimamodell, betrieben von Meteo France

ASCII American Standard Code for Information Interchange

ATV-DVWK Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (aktuell: DWA)

AWEEMSS Analyse der Wirkungsmechanismen von Endenergieeffizienz-Maßnahmen und Entwicklung geeigneter Strategien für die Selektion ökonomisch-effizienter Maßnahmenpakete (Forschungsprojekt)

B-VG Bundes-Verfassungsgesetz

BABS Bundesamt für Bevölkerungsschutz, Schweiz

BAFU Bundesamt für Umwelt, Schweiz

BAMS Bulletin of the American Meteorological Society

BAU Business as usual

BAW Bundesamt für Wasserwirtschaft

BC Black Carbon

BEV Battery Electric Vehicle

BFE Bundesamt für Energie, Schweiz

BFW Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft

BgBl Bundesgesetzblatt

BGF Bruttogeschossfläche

BioSoil EU-Projekt zum europäischen Waldboden-Monitoring

BIP Bruttoinlandsprodukt

BMASK Bundesministerium für Arbeit, Soziales und Konsumentenschutz

BMLF Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft (aktuell: BMLFUW)

BMLFUW Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft

BMU Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Deutschland (aktuell: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit BMUB)

BMVIT Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

BMWF Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung (aktuell: BMWFW)

BMWFJ Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend (aktuell: BMWFW)

BMWFW Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft

BOKU Universität für Bodenkultur Wien

BORIS Bodeninformationssystem des Umweltbundesamtes

BPV Bauproduktenverordnung

BrC Brauner Kohlenstoff

BSRN Baseline Surface Radiation Network
BTS Basistemperatur der winterlichen Schneedecke
BTV Blauzungen-Virus
BVOC Biogene volatile organische Verbindungen
BWS Bruttowertschöpfung
C Kohlenstoff (Carbon)
°C Grad Celsius
CAFE Corporate Average Fuel Economy
CAM Community Atmospheric Model
CBD Convention on Biodiversity
CC-IMPATY Climate change impact on humidity (ACRP Forschungsprojekt)
CCCA Climate Change Centre Austria
CCHF Krim-Kongo-Hämorrhagisches Fieber
CCLM COSMO-ClimateLimited-areaModelling
CCN Cloud condensation nuclei (Wolkenkondensationskerne)
CCS Carbon Capture and Storage
CCSM Community Climate System Model
CDM Clean Development Mechanism
CDP Carbon Disclosure Project
CDR Climate Data Record
CEC Commission of the European Communities
CEER Council of European Energy Regulators
CERES Clouds and the Earth's Radiant Energy System, NASA
CERG Centre for Environmental Research Geneve
CESM Community Earth System Model
CFC Chlorofluorocarbon
CGE Computable General Equilibrium
CGIAR Consultative Group on International Agricultural Research
CH_4 Methan
CHAMP Challenging Mini-Satellite Payload
CICES Common International Classification of Ecosystem Goods and Services
CIMS Quadrupol-Massenspektroskopie mit chemischer Ionisierung
CIP Kurz für UKCIP – UK climate impact program
CIPRA Commission Internationale pour la Protection des Alpes (Internationale Alpenschutzkommission)
CLEOS Climate sensitivity of regional energy systems – a spatial optimisation approach (ACRP Forschungsprojekt)
CLIMATE-ADAPT European Climate Adaptation Plattform
ClimCatch Impact of climate change on the sediment yield of alpine catchments (ACRP Forschungsprojekt)
ClimChAlp Climate change, impacts and adaptation strategies in the Alpine Region (EU Interreg III B Forschungsprojekt)
CLISP Climate Impacts and Spatial Planning (EU Forschungsprojekt)
CLIVALP Climate Variability Studies in the Alpine Region (FWF Forschungsprojekt)
CLM / CCLM COSMO CLM regionales Klimamodell
CMIP Coupled Model Intercomparison Project
CMIP3 Coupled Model Intercomparison Project Phase 3
CMIP5 Coupled Model Intercomparison Project Phase 5
CN Condensation nuclei (Kondensationskerne)
CNG Compressed Natural Gas
CO Kohlenmonoxid
CO_2 Kohlendioxid
CO_2eq Kohlendioxid-Äquivalente (bezogen auf das Treibhausgas-Potenzial)
COIN Costs of Inaction (ACRP Forschungsprojekt)
CoLs Cutoff Lows
COM EU Commission (=KOM)
CONHAZ Costs of Natural Hazards
COP Conference of the Parties to the UNFCCC
COP Coefficient of Performance, Verhältnis von Nutzenergie zu Stromaufnahme bei Wärmepumpen
CORDEX COrdinated Regional Climate Downscaling Experiment (WCRP Forschungsprojekt)
Corg organisch gebundener Kohlenstoff
COSMO-CLM Consortium for Small Scale Modelling – Climate Local Model
COST Cooperation in Science and Technology (Programm der EU)
CPI Current Policy Initiatives
CRED Center for Research on Environmental Decisions
CRSM Coarse Resolution Subregional Mean
CRUT Climate Research Unit Temperature
CTRL Kontrolllauf
DACP Dark Ages Cold Period
DBR Deutsche Bank Research
DCE Discrete Choice Experiments
DEMIFER Demographic and migratory flows affecting European regions and cities (EU Forschungsprojekt)
DEUCALION DEtermining and VisUalizing Impacts of Greenhouse Climate Rainfall in ALpIne Watersheds ON Torrential Disasters (ACRP Forschungsprojekt)
DG CLIMA Directorate-General Climate Action
DG ENV EU Directorate-General for Environment
DG RTD EU Directorate-General for Research and Technological Development, aktuell: Directorate-General for Research and Innovation
DGE Deutsche Gesellschaft für Ernährung
DGTREN EU Directorate-General for Transport and Energy

DICE Ein Integrated Assessment Model
DJF Periode: Dezember-Jänner-Februar
DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DNA Desoxyribonukleinsäure
DOC Dissolved organic carbon compounds; gelöster organischer Kohlenstoff
DOI Digital Object Identifier
DU Dobson Units
DWD Deutscher Wetterdienst
E-DL Energiedienstleistung
E-OBS Gerasterter europäischer Beobachtungsdatensatz mit täglichen Werten für Temperatur und Niederschlag
EA Eastern Atlantic Pattern
EACC Eastern Alpine Conifer Chronology
EAVG Energieausweis-Vorlage-Gesetz
eBod Web-GIS-Applikation: Digitale Bodenkarte 1:25 000 von Österreich
EC European Commission
EC Elementarer Kohlenstoff
ECA Energie-Control Austria
ECCP European Climate Change Programme
ECDC European Center for Disease Control and Prevention
ECF European Climate Foundation
ECHAM European Centre Hamburg Model (globales Klimamodell, betrieben von Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg)
ECHAM4 Version 4 von ECHAM
ECHAM5 Version 5 von ECHAM
ECLAC Economic Commission for Latin America and the Caribbean
ECMWF European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EDV Elektronische Datenverarbeitung
EEA European Environment Agency (Europäische Umweltagentur)
EECCAC Energy Efficiency and Certification of Central Air Conditioners
EEG Energy Economics Group der Technischen Universität Wien
EESI Environmental and Energy Study Institute
EET Erneuerbare Energieträger
EFES Energieeffiziente Siedlungen (Forschungsprojekt)
EFFIS European Forest FIre Information System (Europäisches Waldbrand-Informationssystem)
EFH Einfamilienhaus
EL.ADAPT Auswirkungen des Klimawandels und Anpassungen im Elektrizitätssektor am Beispiel von Österreich im Europäischen Kontext (ACRP Forschungsprojekt)
ElWOG Elektrizitätswirtschafts- und -organisationsgesetz
EMAS Eco-Management and Audit Scheme
EMAS-VO EMAS Verordnung
EMF Energy Modeling Forum
ENSEMBLES EU Forschungsprojekt für regionale Klimamodellierung
ENSO El Nino Southern Oscillation
ENVISAT Environmental Satellite
EP Eastern Pacific Pattern
EPBD Energy Performance of Buildings Directive (EU Gebäude-Richlinie)
ER Essential requirements
ERA European Reanalysis
ERBS Earth Radiation Budget Satellite
EROI Energy Return on Investment
ESCO Energy service company
ESD Effort Sharing Decision; EU-Entscheidung zur gemeinsamen Emissionsreduktion
ESDW European Severe Weather Database
ESM Earth System Model
ESPON European Spatial Planning Observation Network
ESSL European Severe Storms Laboratory
ETH Eidgenössische Technische Hochschule
EU Europäische Union
EU-ETS European Emissions Trading Scheme (europäisches Emissionshandelssystem)
EU-EHS europäisches Emissionshandelssystem
EUA Eurpean Union Allowance
EUBIONET European bioenergy network
EUCLID European Cooperation for Lightning Detection
EURAC Europäische Akademie Bozen
EURO4M-APGD European Reanalysis and Observations for Monitoring- Alpine Precipitation Grid Dataset – alpenweiter Niederschlagsdatensatz
Eurostat Statistisches Amt der Europäischen Union
EW Einwohnergleichwerte
EWENT Extreme Weather Events (EU FP7 Forschungsprojekt)
EZG Einzugsgebiet
F-Gase Fluorierte Treibhausgase
FAO Food and Agriculture Organization of the United Nations
FCKW Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffverbindungen
FEM Floodplain Evaluation Matrix
FFH-RL Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie
FIRIA Fire Risk and Vulnerability of Austrian Forests under the Impact of Climate Change (ACRP Forschungsprojekt)
FLOATS Floating Buoys

FMRB Flussmorphologischer Raumbedarf
FNA Fachnormenausschuss
FÖL Finale Ökosystemleistungen
FSME Frühsommer-Meningo-Encephalitis
FTI Forschung, Technologie und Innovation
FUND Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution (Integrated Assessment Model)
FV Fotovoltaik
FWF Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung
GAR Greater Alpine Region
GAW Global Atmospheric Watch
GCAM Global Change Assessment Model
GCM General Circulation Model / Global Circulation Model / Global Climate Model
GCOS Global Climate Observing System
GDP Gross Domestic Product (Bruttoinlandsprodukt)
GDV Gesamtverband der deutschen Versicherungswirtschaft
GEA Global Energy Assessment
GEF Global Environment Facility
GEMS Global Environmental Monitoring System
GERN Gesunde Ernährung und Nachhaltigkeit
GFDL Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
GHG Greenhouse Gas (Treibhausgas)
GIS Geographisches Informationssystem
GJ Gigajoule, 1 Mrd. Joule
GLORIA Global observation research initiative in alpine environments
GLP Global Land Project
GOOS Global Ocean Observing System
GPS Global Positioning System
GrDS Grenzschleppspannung
GrUS Sedimentationsschleppspannung
Gt Gigatonnen, 1 Mrd. Tonnen
GUSTAVO Genf, Uri, Schwyz, Tessin, Appenzell Innerrhoden, Valais, Obwalden
GWP Global Warming Potential
GWS Gemeinnützige Alpenländische Gesellschaft für Wohnungsbau und Siedlungswesen m.b.H.
GZP Gefahrenzonenplanung
H_20 Wasser
ha Hektar
HadAM3H Ein globales Klimamodell, betrieben vom Hadley Centre England
HadCM3 Ein globales Klimamodell, betrieben vom Hadley Centre England
HARIS-CC Hail Risk and Climate Change (Forschungsprojekt)
HDI Human Development Index
HEAT Health Economic Assessment Tools
HFC Teilfluorierte Verbindungen
HH Haushalt
HIRHAM Ein regionales Klimamodell, betrieben vom Meteorologischen Institut Dänemark
HISTALP Historical Instrumental Climatological Surface Time Series of the Greater Alpine Region – homogenisierte Beobachtungsdaten im Alpenraum
HOBI Holz- und Biomasse-Aufkommensstudie für Österreich
HOCLIS Homogenisation of Climate Series
HOMOP Aufbau und Installierung eines Tools zur operationellen Homogenisierung von Klimadaten
HORA Hochwasserrisikozonierung-Austria
HQ_{100} Extremereignis mit einem durchschnittlichen Wiederkehrintervall von 100 Jahren
HT Hochtemperatur
HULIS Humic like substances
HWB Heizwärmebedarf, Nutzwärmebedarf für die Raumheizung
HWF90 Hitzewellendefinition: Überschreitung des 90. Perzentils von Tmax an 6 aufeinander folgenden Tagen
HyDaMS Hydrographisches Datenmanagement System
IAG International Association of Geomorphologists
IASG Impact and Adaptation Steering Group
IBRD International Bank for Reconstruction and Development
ICOADS International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set
IEA International Energy Agency (Internationale Energieagentur)
IEE Intelligent Energy Europe
IFAD International Fund for Agricultural Development
IFOAM International Federation of Organic Agriculture Movements
IHS Institut für Höhere Studien
IKT Informations- und Kommunikationstechnik
IMAGE Integrated Model to Assess the Global Environment
INCA Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis – gerasterter österreichischer meteorologischer Beobachtungsdatensatz
INTERREG Interregional Cooperation Programme
INVEKOS Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem
IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change
IPCC AR5 Intergovernmental Panel on Climate Change, Assessment Report 5
ISMN International Soil Moisture Network
ISO International Organization for Standardization

ITF International Transport Forum
JAMA Japan Automobile Manufacturers Association
JI / CDM Joint Implementation / Clean Development Mechanism
JJA Periode: Juni-Juli-August
JRA Japanese Reanalysis
JRC Joint Research Centre (of the European Commission)
K Kelvin
KAMA Korea Automobile Manufacturers Association
KB Kühlbedarf, Nutzwärmebedarf für die Raumkühlung
KFU Karl-Franzens-Universität Graz
Kfz Kraftfahrzeug
KKW Kernkraftwerk
KLIEN Klima- und Energiefonds
KLIWA Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft – Deutsches Forschungsprogramm
KOM EU Kommission
KONSENS KonsumentInnen und Energiesparmaßnahmen (KLIEN Forschungsprojekt)
KONTIV Kontinuierliche Erhebung zum Verkehrsverhalten
KS Konstantes Szenario
KSG Klimaschutzgesetz
KWK Kraft-Wärme-Kopplung
LDC Least Developed Countries
LED Lichtemittierende Dioden
LF Low-Frequency
LFZ Lehr- und Forschungszentrum
LIA Little Ice Age
LiDAR Light Detection and Ranging
LIFE LIFE Programme (EU Finanzinstrument zur Förderung von EU-weiten Umwelt- und Naturschutzprojekten)
LiNet Lightning Detection Network
LKH Landeskrankenhaus
LKW Lastkraftwagen
LNF Leichte Nutzfahrzeuge
LTER Long-Term Ecosystem Research Network
LUC Land use change (Landnutzungsänderung)
LULUCF Land use, land use change and forestry (Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft)
m ü.A. Seehöhe in Meter über Pegel Adria
MA 18 Magistratsabteilung 18 der Stadt Wien
MACC Monitoring Atmospheric Composition and Climate
MAM Periode: März, April, Mai
MCA Medieval Climate Anomaly
MCS Mesoskaliges konvektives Sturmsystem
MEA Millennium Ecosystem Assessment
MERRA Modern Era Retrospective Reanalysis
MESSAGE Mobile Environmental Sensing System Across Grid Environments
MFH Mehrfamilienhaus
MIA Marginal Impact Abatement
MIV Motorisierter Individualverkehr
MM Mit Maßnahmen
MM5 Regionales Klimamodell, entwickelt von NCAR USA
MOREXPERT Developing a Monitoring System for Hazardous Rock Walls
MOTU Molecular operational taxonomic units
MOZAIC Measurement of Ozone on Airbus In-service Aircraft
MSU Microwave Sounding Unit
Mt Megatonnen, 1 Mio. Tonnen
MUKLIMO Mikroskaliges Urbanes Klimamodell des Deutschen Wetterdienstes
MWP Medieval Warm Period
MZM Mit zusätzlichen Maßnahmen
N Stickstoff
N_2 molekularer (unreaktiver) Stickstoff
N_2O Distickstoffoxid (Lachgas)
NACE Nomenclaute européenne des activités économiques, Systematik zur statistischen Erfassung der Wirtschaftszweige
NADW North Atlantic Deep Water
NALPS Record of precisely dated stalagmites from caves located at the northern rim of the Alps
NAMEA National Accounting Matrix including Environmental Accounts
NAO Nord-Atlantik-Oszillation
NAP Nationaler Allokationsplan
NAPAs National Adaptation Programmes of Action
NAS Nationale Anpassungsstrategie (Strategie zur Anpassung an den Klimawandel)
NAS National Academy of Sciences (USA)
NASA National Aeronautics and Space Association (USA)
NAT 91 Neuer Austrotakt (Taktfahrplan der ÖBB, vorgestellt 1991)
NATHAN World Map of Natural Hazards
NATO North Atlantic Treaty Organisation
NCAR National Center for Atmospheric Research (USA)
NCEP National Center for Environmental Prediction (USA)
NEE Net Ecosystem Exchange
NF_3 Stickstofftrifluorid
NFP Nationales Forschungsprogramm (Schweiz)
NGO Non Goventmental Organisation
NGP Nationaler Gewässerbewirtschaftungsplan
NGRIP North Greenland Ice Core Project
NH_3 Ammoniak

NH_4+ Ammonium
NIDI Nederlands Interdisciplinair Demografisch Instituut
NIR National Inventory Report
NMHC Nichtmethankohlenwasserstoffe
N_{min} Mineralstickstoff
NMV Nicht motorisierter Verkehr
NMVOC Non Methane Volatile Organic Compounds
NN Normal Null
NÖ LAK Niederösterreichische Landesakademie
NO_3 Nitrat
NOAA National Ocean and Atmosphere Administration (USA)
NO_x Stickstoffoxide
NPI New Policy Initiatives
NPO Nord-Pazifik-Oszillation
NPP Nettoprimärproduktion
N_r Reaktiver Stickstoff
NREAP National Renewable Energy Action Plan
NT Niedertemperatur
NUTS Nomenclature des unités territoriales statistiques (statistische Gebietsseinheiten)
NWG Nichtwohngebäude
NWI Nationaler Wohlfahrtsindex
NWP Nairobi Work Programme der UNFCCC
O_3 Ozon
OBS Observations
OC Organischer Kohlenstoff
OcCC Organe consultatif sur les changements climatiques (Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung, Schweiz)
OECD Organisation for Economic Co-operation and Development (Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung)
OEREK Österreichisches Raumentwicklungskonzept
OFDA Office of US Foreign Disaster Assistance
OH-Radikale Hydroxyl-Radikal
OHC Oceanic Heat Content
ÖHT Österreichische Hotel- und Tourismusbank
ÖHV Österreichische Hoteliervereinigung
OIB Österreichisches Institut für Bautechnik
OITAF Organizzazione internazionale trasporti a fune (Internationale Organisation für das Seilbahnwesen)
OM Organisches Material
ÖNACE Österreichische NACE
ÖNORM Vom Austrian Standards Institute veröffentlichte nationale Norm
ONS Office for National Statistics (UK)
ÖPNV Öffentlicher Personennahverkehr
ÖPUL Österreichischen Programm zur Förderung einer umweltgerechten, extensiven und den natürlichen Lebensraum schützenden Landwirtschaft
ORAS Ocean Reanalysis System
ORC Organic Rankine Cycle
ORF Österreichischer Rundfunk
ÖROK Österreichische Raumordnungskonferenz
OST Office of Science and Technology
ÖSTA Österreichisches Staatsarchiv
ÖSTRAT Österreichische Strategie für eine nachhaltige Entwicklung
ÖV Öffentlicher Verkehr
OVE Österreichischen Verband für Elektrotechnik
ÖWAV Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband
ÖWI Österreichische Waldinventur
p.a. per annum
PAGE Ein Integrated Assessment Model
PAME Primäre Amöbenmeningoenzephalitis
PCA Principal Component Analysis
PDSI Palmer Drougth Severity Index
PEB Primärenergiebedarf
PESETA Projection of Economic Impacts of Climate Change in Sectors of the European Union based on Bottom-up Analysis
PET Physiologically equivalent temperature
PEV Primärenergieverbrauch
PFC Vollfluorierte Kohlenwasserstoff-Verbindungen
PH Passivhaus
pH-Wert Maß für den sauren oder basischen Charakter einer wässrigen Lösung
PHI Potential Hail Index – Kenngröße für Hagelwahrscheinlichkeit
PIK Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung
PJ Petajoule= 1 015 J = 1 000 Terajoule
Pkm Personenkilometer
PKW Personenkraftwagen
PM Feinstaub (particulate matter)
PM10 Feinstaub (Korngrößen kleiner als 10 µm aerodynamischer Durchmesser)
PM2.5 Feinstaub (Korngrößen kleiner als 2,5 µm aerodynamischer Durchmesser)
PNA Pacific North American Pattern
PNAS Proceedings of the National Academy of Science (USA)
PNV Potentielle natürliche Vegetation
POT Peaks over Threshold
POTETA Strategie zur Mobilisierung des Stromsparptenzials in Österreich (KLIEN Forschungsprojekt)
ppm parts per million
PPP Purchasing Power Parity (Kaufkraftparität)

PRESENCE Power through Resilience of Energy Systems: Energy Crises, Trends and Climate Change (ACRP Forschungsprojekt)
PRIMES A computable Price-driven equilibrium Model of the Energy System and Markets for Europe
PRODIGE Homogenisierungsmethode für monatliche Klimadaten aus Frankreich
PRUDENCE EU Forschungsprojekt für regionale Klimamodellierung
PSC Polare Stratosphärenwolke
PTR-TOF-MS Protonen-Tausch-Reaktions-Flugzeit-Massenspektrometer
PVC Polyvinylchlorid
Q95 Niederwasserabflüsse, die mit 5 % Wahrscheinlichkeit unterschritten werden
QBO Quasi-Biennal Oscillation
QM Quantile mapping – statistische Methode zur Datenaufbereitung
RCA3 Regionales Klimamodell, betrieben von Rossby Centre Schweden
RCAO Rossby Centre regional Atmosphere – Ocean climate model
RCM Regional climate model
RCP Representative Concentration Pathway
RCP 2.6 Representative Concentration Pathway - 2.6W/m² des IPCC 2013
RCP 4.5 Representative Concentration Pathway - 4.5W/m² des IPCC 2013
RCP 8.5 Representative Concentration Pathway - 8.5W/m² des IPCC 2013
RECLIP:CENTURY Research on Climate Protection (ACRP Forschungsprojekt)
RED Renewable Energy Directive
REDD Reducing Emissions from Deforestation and Degradation
RegCM Regionales Klimamodell (betrieben von ICTP Triest)
REMO Regionales Klimamodell (betrieben von MPI Hamburg)
REMO-UBA Klimalauf im Auftrag des Deutschen Umweltbundesamtes mit dem regionalen Klimamodell REMO
RES-Richtlinie EU Directive on Electricity Production from Renewable Energy Sources (EU Erneuerbare-Energien-Richtlinie)
RK Raumkälte
RW Raumwärme
RWP Roman Warm Period
RWTH Rheinisch-Westphälisch Technische Hochschule
SBSTA Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice
SCC Social Costs of Carbon
SCNAT Swiss Academy of Sciences
scZ-Index Self-calibrated Palmer Z-Index
SEC Interne Dokumente der EU-Kommission, vorbereitet vom Generalsekretariat
SERI Sustainable Europe Research Institute
SF Szenario Forciert
SF_6 Schwefelhexafluorid
SicAlp Standortsicherung im Kalkalpin (Interreg-Projekt)
SNF Schwere Nutzfahrzeuge
SNP Sägenebenprodukte
SO_2 Schwefeldioxid
SOA Sekundäres organisches Aerosol
SOM Soil Organic Matter (organische Bodensubstanz)
SP Szenario Pragmatisch
SPA Shared climate Policy Assumptions
SPLIDHOM Spline daily homogenization
SPM Summary for Policymakers
SRES Special Report on Emission Scenarios des IPCC
SREX Special Report on Managing the Risks of Extreme Events des IPCC
SRM Solar Radiation Management
SSC Strategic Society Center
SSP Shared Socio-Economic Reference Pathways
STATcube Statistisches Datenbanksystem von Statistik Austria
SVOC Semi-volatile organische Verbindungen
T-MONA Tourismus Monitor Austria
TAR Third Assessment Report des IPCC
TAWES Teilautomatische Wetterstation
TC Gesamtkohlenstoff
TEEB The Economics of Ecosystems and Biodiversity
THG Treibhausgas
TIHALO Tierhaltung und Wirtschaftsdüngermanagement in Österreich (BMLFUW Forschungsprojekt)
Tkm Tonnenkilometer
T_{max} Tagesmaximaltemperatur
TSA Tourismus-Satellitenkonto
TSI Total solar irradiance
TU Wien Technische Universität Wien
TW Terawatt = 1012 Watt = Billion Watt
TWh Terawattstunden
U-Wert Wärmedurchgangskoeffizient von Bauteilen in W/m²K
ü.d.M. Höhe über dem mittleren Meeresspiegel
UBA Umweltbundesamt

UFI Umweltförderung im Inland des BMLFUW
UFT-ADI Urban fabric types and microclimate response
UK United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland
UKCIP United Kingdom Climate Impact Programme
UMA Umwelt Management Austria
UN United Nations
UN / ECE United Nations Economic Commission for Europe
UNCCD United Nations Convention to Combat Desertification
UNDP United Nations Development Programme
UNECE United Nations Economic Commission for Europe
UNEP United Nations Environment Programme
UNESCO United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
UNFCCC United Nations Framework Convention on Climate Change
UNWTO United Nations World Tourism Organisation
URAS CO_2 Meßgerät
USD United States Dollar
UV Ultraviolett
UVB Ultraviolettstrahlung im UVB-Bereich (280–320 Nanometer)
UVE Umweltverträglichkeitserklärung
UVP Umweltverträglichkeitsprüfung
VAISALA Hersteller meteorologischer Geräte
VERACLIM Vienna Enhanced Resolution Analysis CLIMatology
VGR Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung
VOC Volatile organische Verbindungen
VTPI Victoria Transport Policy Institute
VTT Technical Research Centre of Finland
WA West Atlantic Pattern
WAM With Additional Measures
WAMOD Auswirkungen des Klimawandels auf Österreichs Wälder – Entwicklung und vergleichende Evaluierung unterschiedlicher Prognosemodelle (ACRP Forschungsprojekt)
WASA Waves and Storms in the North Atlantic (Forschungsprojekt)
WBGU Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderung der deutschen Bundesregierung
WCRP World Climate Research Programme
WDPA World Database on Protected Areas
WegenerNet Klima-Stationsnetz des Wegener Centers, Universität Graz
WEM With Existing Measures
WEO World Economic Outlook
WEO World Energy Outlook
WFA Wirkungsfolgenabschätzungen
WGI Working Group 1 des IPCC
WGII Working Group 2 des IPCC
WGIII Working Group 3 des IPCC
WHO World Health Organisation (Weltgesundheitsorganisation)
WIFO Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung
WKK Wärme-Kraft-Kopplung
WKO Wirtschaftskammer Österreich
WMO World Meteorological Organization
WP Wärmepumpe
WP West Pacific Pattern
WRRL EU-Wasserrahmenrichtlinie
WS Wachstumsszenario
WW Wirtschaftswachstum
WWF World Wildlife Fund for Nature
WWWB Wärmebedarf für Warmwasserbereitung, Nutzenergie
XBT Expendable Bathythermograph
ZAMG Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Österreich
ZENAR Zentrum für Naturgefahren – BOKU
ZfE Zusammenfassung für Entscheidungstragende

Anhang 2: Verzeichnis des Wissenschaftlichen Beirates, der Review EditorInnen, der ReviewerInnen und der AutorInnen

Wissenschaftlicher Beirat / Scientific Advisory Board (SAB)

Jill Jäger – Senior Consultant, Wien. Vorsitzende des SAB AAR14

Daniela Jacob – Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M), Hamburg

Dirk Messner – Institut für Entwicklungspolitik (DIE), Bonn

Review EditorInnen

Brigitte Bach (Band 3, Kapitel 3 und 5) – Austrian Institute of Technology

Sabine Fuss (Band 3, Kapitel 1 und 6) – Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change

Dieter Gerten (Band 2, Kapitel 2) – Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

Martin Gerzabek (Band 2, Kapitel 5) – Universität für Bodenkultur Wien

Peter Houben (Band 2, Kapitel 4) – Universiteit Leiden

Carsten Loose (Band 2, Kapitel 3) – Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen

Hermann Lotze-Campen (Band 2, Kapitel 6; Band 3, Kapitel 2) – Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

Fred Luks (Band 1, Kapitel 5) – Wirtschaftsuniversität Wien

Wolfgang Mattes (Band 1, Kapitel 2) – Umweltbundesamt

Sabine McCallum (Band 1, Kapitel 3) - Umweltbundesamt

Urs Neu (Band 3, Kapitel 4) – Schweizer Akademie der Naturwissenschaften

Andrea Prutsch (Band 2, Kapitel 1) – Umweltbundesamt

Mathias Rotach (Band 1, Kapitel 1 und 4) – Universität Innsbruck

Externe ReviewerInnen

Soweit die externen ReviewerInnen der Bekanntgabe ihrer Namen zugestimmt haben, sind sie im Folgenden aufgeführt. Weitere 55 ReviewerInnen werden hier nicht namentlich erwähnt bzw. bleiben auf eigenen Wunsch anonym. Einige der AAR14 AutorInnen beteiligten sich auch am Reviewprozess – diese sind hier nicht aufgelistet.

Leonardo Baretto-Gomez – Austrian Energy Agency

Nico Bauer – Potsdam Institute for Climate Impact Research

Thomas Bruckner – Universität Leipzig

Stefan Hörtenhuber – Forschungsinstitut für biologischen Landbau Switzerland und Universität für Bodenkultur Wien

Hubert Holzmann – Universität für Bodenkultur Wien

Fortunat Joos – Universität Bern

Margareth Keiler – Universität Bern

Werner Krauß – Hemholtz-Zentrum Geesthacht

Walter Leal – Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Patrick Nussbaumer – United Nations Industrial Development Organization

Frank Preusser – Universität Stockholm

Peter Rafaj – International Institute for Applied Systems Analysis

Stefan Reis – NERC Centre for Ecology & Hydrology, United Kingdom

Uwe Stöber – Universität Bremen

Dirk van Husen – ehem. Technische Universität Wien

Werner Zollitsch – Universität für Bodenkultur Wien

AutorInnen

Nachfolgend sind die mitwirkenden AutorInnen und weitgehend ihre in den Österreichischen Sachstandsbericht eingebrachte Expertise sowie ihre primäre organisatorische Zuordnung aufgelistet.

Ahrens, Bodo; Univ.-Prof. Dipl.Phys. Dr.; Meteorologie; Klimatologie; Institut für Atmosphäre und Umwelt, J.W.v. Goethe Universität Frankfurt am Main

Ajanovic, Amela; Dipl.-Ing. Dr.; Energiewirtschaft; Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe, Technische Universität Wien

Amon, Barbara ; Priv.-Doz.Dr.; Landwirtschaft; Emissionen; Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V (ATB)

Amon, Thomas; Univ.-Prof. Dr.; Landwirtschaft; Emissionen; Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V (ATB)

Anders, Ivonne; Dipl.-Ing.; Klimamodellierung; Klimatologie ; Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Abteilung für Klimaforschung, Wien

Aschauer, Isabella; Mag.; Aerosolphysik; Emissionstabellen; Fakultät für Physik, Universität Wien

Aspöck, Horst; Univ.-Prof. Dr.; Parasitologie,, Entomologie; Institut f. Spezifische Prophylaxe und Tropenmedizin, Medizinische Universität Wien

Auer, Ingeborg; Dr.; Meteorologie; Klimatologie; Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Abteilung für Klimaforschung, Wien

Balas, Maria; Dr.; Umweltforschung; Klimawandel; Umweltbundesamt, Abteilung für Umweltfolgenabschätzung und Klimawandel, Wien

Bauer†, Heidi; Dr. ; Umweltanalytik; Bioaerosole; Institut für Chem.Technologien und Analytik, Technische Universität Wien

Baumann, Martin; Dr.; Erneuerbare Energie; Energieforschung; Austrian Energy Agency, Wien

Baumgarten, Andreas; Dr.; Bodenkunde; Pflanzenernährung; Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit (AGES), Wien

Bednar-Friedl, Birgit; Assoz. Prof. Dr.; Umweltökonomie; Umweltpolitik; Wegener Center für Klima und Globalen Wandel, Universität Graz

Bell, Rainer; Dr.; Geomorphologie; Naturgefahren/-risiken; Institut für Geographie und Regionalforschung, Universität Wien

Berger, Tania; Dipl.-Ing. Dr.; Architektur; Bauen und Umwelt, Donau-Universität Krems

Bittermann, Wolfgang; Dr. ; Energiestatistik; Direktion Raumwirtschaft, Statistik Austria, Wien

Blamauer, Bernadette; Dipl.-Ing.; Hydrologie; Wasserwirtschaft; Universität für Bodenkultur, Wien

Blöschl, Günther; Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.; Hydrologie; Wasserwirtschaft; Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Technische Universität Wien

Blum, Winfried E.H.; Dipl.Ing. Dr. Dr.h.c.mult. em.o.Univ.-Prof.; Bodenkunde; Landnutzungsplanung; Universität für Bodenkultur, Wien

Bodner, Gernot; Dipl.-Ing. Dr.; Landwirtschaft; Pflanzenbau; Universität für Bodenkultur, Wien

Böhm†, Reinhard; Dr.; Meteorologie; Klimatologie; Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien

Bohner, Andreas; Mag. Dr.; Grünlandökologie; Grünlandökologie; LFZ Raumberg-Gumpenstein, Abteilung für Umweltökologie, Irdning

Brezina, Tadej; Dipl.-Ing.; Verkehrsplanung; Institut für Verkehrswissenschaften; Technische Universität Wien

Brunner, Karl-Michael; Ao.Univ.-Prof. Dr.; Gesellschaftliche Dimensionen; Sozialstruktur; Institut für Soziologie und empirische Sozialforschung, Wirtschaftsuniversität Wien

Brunner, Thomas; Dipl.-Ing. Dr.; Biomassefeuerungstechnik; Emissionsbildung; BIOENERGY2020+ GmbH, Graz

Brunner , Christoph; Dipl.-Ing.; Verfahrenstechnik; Arge Erneuerbare Energie Dachverband, Gleisdorf

Buchner, Barbara; Dr.; Umweltpolitik; Klimawandel; Climate Policy Initiative, Venice Office, Venedig

Campregher, Christoph; Dr., MSc; Sozial- und Kulturanthropologie; Umweltsoziologie; Sustainable Europe Research Institute (SERI), Wien

Cech, Thomas; Dr.; Baumschäden; Institut für Waldinventur, Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW), Wien

Chimani, Barbara; Mag.; Meteorologie; Klimatologie; Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien

Coy, Martin; Univ.-Prof. Dr.; Humangeographie; Nachhaltigkeitsforschung; Institut für Geographie, Universität Innsbruck

Damm, Andrea; Mag.; Regionalpolitik; Risiko- und Ressourcenökonomik; POLICIES – Zentrum für Wirtschafts- und Innovationsforschung, Joanneum Research, Graz

Dersch, Georg; Dr.; Pflanzenbau; Interpretation Bodenuntersuchungen; Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit (AGES), Wien

Diendorfer, Gerhard; Dr.; Blitzortung; Blitzphysik; Österreichischer Verband für Elektrotechnik (OVE), Wien

Dobersberger, Paul; Mag.; Meteorologie; Gleitschnee; Institut für Naturgefahren, Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW), Innsbruck

Dokulil, Martin; Ao.Univ.-Prof. Dr.; Limnologie; Forschungsinstitut für Limnologie, Mondsee, Universität Innsbruck

Dullinger, Stefan; Univ.-Prof. Mag. Dr.; Botanik; Department für Botanik und Biodiversitätsforschung, Universität Wien

Eitzinger, Josef; Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.; Landwirtschaft; Agrarmeteorologie; Institut für Meteorologie, Universität für Bodenkultur, Wien

Embleton-Hamann, Christine; Ao.Univ.-Prof. Dr.; Geomorphologie; Umweltveränderungen; Institut für Geographie und Regionalforschung, Universität Wien

Englisch, Michael; Dipl.-Ing. Dr.; Waldökologie; Bodenkunde; Institut für Waldökologie und Boden, Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW), Wien

Essl, Franz; Univ.-Doz. Mag. Dr.; Biodiversität; Naturschutz; Department für Botanik und Biodiversitätsforschung, Universität Wien

Foelsche, Ulrich; Assoz. Univ.-Prof. Dr.; Atmosphärenphysik; Klima; Wegener Center für Klima und Globalen Wandel, Universität Graz

Formayer, Herbert; Assist. Prof. Mag. Dr.; Meteorologie; Klimamodellierung; Institut für Meteorologie, Universität für Bodenkultur, Wien

Freudenschuß, Alexandra; Dipl.-Ing.; Bodenschutz; Kohlenstoffhaushalt; Umweltbundesamt, Abteilung Schadstoffe und Mensch, Wien

Friedel, Jurgen; Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.; Landwirtschaft; Ökologischer Landbau; Universität für Bodenkultur, Wien

Fromm, Reinhard; Mag.; Schneephysik; Lawinenprognose; Institut für Naturgefahren, Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW), Innsbruck

Fuchs, Sven; Priv.-Doz. Dr.; Naturgefahren; Risikoforschung; Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien

Gaube, Veronika; Dr.; Umweltsoziologie; Sozial-Ökologische Modellierung; Institut für Soziale Ökologie, Alpen-Adria Universität Klagenfurt, Wien

Geitner, Clemens; Dipl.-Geogr. Dr. assoz. Prof.; Bodengeographie; Landschaftsökologie; Institut für Geographie, Universität Innsbruck

Gepp, Johannes; Priv.-Doz. Dr.; Biodiversität; Naturschutz; Institut für Naturschutz, Naturschutzbund Steiermark, Graz

Glade, Thomas; Univ.-Prof. Dr.; Geomorphologie; Naturgefahren/-risiken; Institut für Geographie und Regionalforschung, Universität Wien

Glauninger, Johann; Ao.Univ.-Prof.i.R. Dipl.-Ing. Dr.; Landwirtschaft; Pflanzenschutz; Universität für Bodenkultur, Wien

Gobiet, Andreas; Assist. Prof. Mag. Dr.; Klimamodellierung; Wegener Center für Klima und Globalen Wandel, Universität Graz

Godina, Reinhold; Dipl.-Ing.; Hydrologie; Wasserbilanz, -haushalt; BMLFUW, Abteilung Wasserhaushalt, Wien

Gollmann, Günter; Priv.-Doz. Dr.; Herpetologie; Department für Theoretische Biologie, Universität Wien

Gottfried, Michael; MMag. Dr.; Botanik; Biodiversität; Department für Naturschutzbiologie, Vegetations- und Landschaftsökologie, Universität Wien

Grabherr, Georg; O.Univ.-Prof. Mag. Dr.; Biologie; Biodiversität; Department für Naturschutzbiologie, Vegetations- und Landschaftsökologie, Universität Wien

Graf, Wolfram; Priv.-Doz. Dr.; Limnologie; Universität für Bodenkultur, Wien

Grummer, Beatrice; Apl. Prof'in Dr.; Tiergesundheit; Tierärztliche Hochschule Hannover

Gschwantner, Thomas; Dipl.-Ing Dr.; Fernerkundung; Waldinventur; Institut für Waldinventur, Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW), Wien

Haas, Reinhard; Univ.-Prof. Dr. Dipl.-Ing.; Energieökonomie; Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe, Technische Universität Wien

Haas, Willi; Dipl.-Ing.; Sozialökologische Transitionen, Gesundheit; Institut für Soziale Ökologie, Alpen-Adria Universität Klagenfurt, Wien

Haberl, Helmut; Ao.Univ.-Prof. Mag. Dr.; Soziale Ökologie; Integrierte Landsystemforschung; Institut für Soziale Ökologie, Alpen-Adria Universität Klagenfurt, Wien

Habersack, Helmut; Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.; Hydrologie; Wasserwirtschaft; Universität für Bodenkultur, Wien

Hagen, Karl; Dipl.-Ing.; Geomorphologie; Naturgefahren; Institut für Naturgefahren, Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW), Wien

Haimberger, Leopold; Ao.Univ.-Prof. Mag. Dr.; Meteorologie; Klimatologie; Institut für Meteorologie und Geophysik, Universität Wien

Hansel, Armin; Ao.Univ.-Prof. Dr.; Umweltphysik; atmosphärische organische Spurenstoffe; Institut für Ionenphysik und Angewandte Physik, Universität Innsbruck

Hanzer, Florian; MA; Glaziologie; Institut für Geographie, Universität Innsbruck

Hartner, Michael; Mag.; Energiewirtschaft; Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe, Technische Universität Wien

Haslinger, Klaus; Mag.; Klimatologie; Hydrologie; Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Abteilung Klimaforschung, Wien

Haslmayr, Hans-Peter; Dipl.-Ing. Dr.; Bodenkunde; Landschaftsplanung; Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit (AGES), Wien

Hausberger, Stefan; Ao.Univ.-Prof. Dr.; Verbrennungskraftmaschinen; Fahrzeugemissionen; Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, Technische Universität Graz

Heinrich, Georg; Mag. Dr.; Klimaphysik; Klimamodellierung; Wegener Center für Klima und Globalen Wandel, Universität Graz

Herrnegger, Matthew; Dipl.-Ing. Dr.; Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau, Universität für Bodenkultur, Wien

Hirschler, Petra; Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Dr.; Raumplanung; Institut für Regionalplanung und Regionalentwicklung, Technische Universität Wien

Hitzenberger, Regina; Univ.-Prof. Dr.; Aerosolphysik; Umweltphysik; Fakultät für Physik, Universität Wien

Hoch, Gernot; Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr.; Institut für Waldschutz, Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW), Wien

Höferl, Karl-Michael; Dr.; Raumplanung; Naturgefahren; Institut für Geographie, Universität Innsbruck

Hofstätter, Michael; Mag.; Meteorologie; Synoptische Klimatologie; Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Fachabteilung Klimavariabilität und Klimamodellierung, Wien

Huber, Sigbert; Dipl.-Ing.; Bodenschutz; Flächenmanagement; Umweltbundesamt, Abteilung Boden und Flächenmanagement, Wien

Hübl, Johannes; Univ.-Prof. Dr.; Risk-Engineering; Muren; Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien

Huttenlau, Matthias; Mag. Dr.; Naturgefahren und Risikoforschung; Klimawandelanpassung; alpS Centre for Climate Change Adaptation, Innsbruck

Hutter, Hans-Peter ; Ass.-Prof. Doz. Dipl.-Ing. Dr.; Umwelthygiene; Medizinische Universität Wien

Illmer, Paul; Mag. Dr. Univ.-Prof.; Bodenmikrobiologie; anaerobe Mikroorganismen; Institut für Mikrobiologie, Universität Innsbruck, Innsbruck

Jandl, Robert; Dipl.-Ing. Dr. Univ.-Doz.; Waldökologie; Bodenkunde; Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW), Wien

Jiricka, Alexandra; Dipl.-Ing. Dr.; Klimawandelanpassung und –vorsorge; Umweltschutz; Institut für Landschaftsentwicklung, Erholungs- und Naturschutzplanung, Universität für Bodenkultur, Wien

Jobstmann, Heide; Mag.; Industrieemissionen; Umweltbundesamt, Abteilung für Luftreinhaltung und Klimaschutz, Wien

Jurkovic, Anita; Mag.; Meteorologie; Datenprüfung und Auswertung; Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien

Kahrer, Andreas; Dr.; Entomologie; Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit (AGES), Wien

Kainz, Martin; Doz. Dr.; Donau-Universität Krems

Kaiser, August; Dr.; Meteorologie; Umweltmeteorologie; Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Fachabteilung Umwelt, Wien

Kalt, Gerald; Dipl.-Ing. Dr.; Energiewirtschaft; Österreichische Energieagentur, Wien

Kammerer, Gerhard; Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.; Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft, Universität für Bodenkultur Wien

Kaser, Georg; Univ.-Prof. Dr.; Glaziologie; Institut für Meteorologie, Universität Innsbruck

Kasper-Giebl, Anne; Ao.Univ.-Prof. Dr.; Umweltanalytik; Luftchemie; Institut für Chem.Technologien und Analytik, Technische Universität Wien

Katzensteiner, Klaus; Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.; Waldbodenkunde; Waldernährung; Institut für Waldökologie, Department für Wald- und Bodenwissenschaften, Universität für Bodenkultur, Wien

Kellerer-Pirklbauer, Andreas; MMag. Dr.; Glaziologie; Geomorphologie; Institut für Geographie und Raumforschung, Universität Graz

Kerschner, Hanns; Ao.Univ.-Prof. Dr.; Klimatologie; Gletscher; Institut für Geographie, Universität Innsbruck

Kettner, Claudia; Mag., MSc; Umweltökonomie; Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung (WIFO), Wien

Kienberger, Stefan; Dr.; Risikoforschung; Klimawandel; Center for Geoinformatics, Universität Salzburg

Kirchengast, Gottfried; Univ.-Prof. Dr.; Klimaforschung; Geophysik; Wegener Center für Klima und Globalen Wandel, Universität Graz

Kirisits, Thomas; Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr.; Institut für Forstentomologie, Forstpathologie und Forstschutz, Universität für Bodenkultur, Wien

Kitzler, Barbara; Dipl.-Ing. Dr.; Bodenökologie; Institut für Waldökologie und Boden, Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW), Wien

Klik, Andreas; Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.; Bodenwasserhaushalt; Bodenerosion; Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft, Universität für Bodenkultur, Wien

Knoflacher, Hermann; Em. Univ. Prof. DI Dr. techn.; Verkehrswesen; Verkehrsplanung; Forschungsbereich für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik, TU Wien

Köberl, Judith; Mag.; Regionalpolitik; Risiko- und Ressourcenökonomik; POLICIES – Zentrum für Wirtschafts- und Innovationsforschung, Joanneum Research, Graz

Koch, Elisabeth; Dr.; Meteorologie; Bioklimatologie; Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien

Koinig, Karin A.; Dr.; Biologie; Palaeolimnologie; Institut für Ökolgie, Universität Innsbruck

König, Martin; Dipl.-Geogr.; Umweltforschung; Klimawandel; Umweltbundesamt, Abteilung für Umweltfolgenabschätzung und Klimawandel, Wien

Köppl, Angela; Dr.; Umweltökonomie; Nachhaltiges Wirtschaften; Klimawandel und Energie; Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung (WIFO), Wien

Krainer, Karl; Univ.-Prof. Dr.; Institut für Geologie, Universität Innsbruck

Kranzl, Lukas ; Dr.; Erneuerbare Energie; Energieforschung; Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe, Arbeitsgebiet Energiewirtschaft, Technische Universität Wien

Kratena, Kurt; Dr.; Energieökonomische Analysen; Modellierung nachhaltiger Entwicklung; Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung (WIFO), Wien

Kreuzinger, Norbert; Ass.-Prof. Mag.rer.nat. Dr.; Siedlungswasserbau; Hydrologie; Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft, Technische Universität Wien

Kromp-Kolb, Helga; Univ.-Prof. Dr.; Meteorologie; Klimatologie; Institut für Meteorologie, Universität für Bodenkultur, Wien

Kuhn, Michael; Univ.-Prof. Dr.; Glaziologie; Institut für Meteorologie, Universität Innsbruck

Ladinig, Andrea; Dr.med.vet.; Meteorologie; Universität Wien

Lexer, Manfred Josef; Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.; Forstwirtschaft; Waldwachstum; Universität für Bodenkultur, Wien

Lieb, Gerhard; Ao. Univ.-Prof. Dr.; Periglazial; Geomorphologie; Institut für Geographie und Raumforschung, Universität Graz

Loibl, Wolfgang; Mag. Dr., MSc; Stadt- und Regionalforschung; Klimawandelanpassung; Austrian Institute for Technology, Energy Department- Sustainable Buildings and Cities, Wien

Loiskandl, Willibald; Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.; Bodenwasserhaushalt; Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft, Universität für Bodenkultur, Wien

Lukas, Aditya; DDipl.-Ing. Dr.; Institut für Hydraulik und Landeskulturelle Wasserwirtschaft, Universität für Bodenkultur, Wien

Macoun, Thomas; Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.; Verkehrsplanung; Institut für Verkehrswissenschaften, Technische Universität Wien

Mailer, Markus; Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.; Institut für Infrastruktur, Arbeitsbereich Intelligente Verkehrssysteme, Universität Innsbruck

Margesin, Rosa; Mag. Dr. Univ.-Prof.; kälteadaptierte Mikroorganismen; alpine Mikrobiologie; Institut für Mikrobiologie, Universität Innsbruck, Innsbruck

Markart, Gerhard; MR Dipl.-Ing. Dr. Dr.hc; Waldboden; Hydrologie; Institut für Naturgefahren, Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW), Innsbruck

Marke, Thomas; Ass.-Univ.-Prof. Dr.; Glaziologie; Institut für Geographie, Universität Innsbruck

Marzeion, Ben; assoz. Univ.-Prof. Dr.; Glaziologie; Institut für Meteorologie, Universität Innsbruck

Matulla, Christoph; Mag. Dr.; Klimamodellierung; Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien

Matzenberger, Julian ; Dipl.-Ing.; Klimawandel; Nachhaltige Technologien; Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe, Arbeitsgebiet Energiewirtschaft, Technische Universität Wien

Mauschitz, Gerd; Dipl.-Ing. Dr.techn.; Mechanische Verfahrenstechnik; Luftreinhaltetechnik; Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften, Technische Universität Wien

Mechler, Reinhard; Dr.; Ökologische Makroökonomie; Naturgefahren und Risikoforschung; Institut für ökologische Ökonomie, Wirtschaftsuniversität Wien

Mehdi, Bano; MSc; Transformationsforschung; Transitions to new technologies program, Internationales Institut für angewandte Systemanalyse (IIASA), Laxenburg

Merz, Ralf; Prof. Dr.; Department Catchment Hydrology, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ, Halle/Saale

Molitor, Ramain; Dipl.-Ing. Dr.; Verkehrswesen; Verkehrsplanung; komobile w7 GmbH, Wien

Monreal, Matthias; MSc; Resilienz; Anpassung; alpS Centre for Climate Change Adaptation, Innsbruck

Moshammer, Hanns; Doz. Dr.; Gesundheit; Umwelthygiene; Institut für Umwelthygiene, ZPH, Medizinische Universität Wien

Müller, Andreas; Dipl.-Ing.; Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe, Technische Universität Wien

Murer, Erwin; Dipl.-Ing.; Bodenwasserhaushalt; Bodenphysik; Bundesamt für Wasserwirtschaft, Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, Petzenkirchen

Nachtnebel, Hans Peter; O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.; Hydrologie; Wasserwirtschaft; Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und Konstruktiven Wasserbau , Universität für Bodenkultur, Wien

Nadeem, Imran; MSc; Klimatologie; Klimamodellierung; Institut für Meteorologie, Universität für Bodenkultur, Wien

Nakicenovic, Nebojsa; Univ.-Prof. Dr. Dr. h.c.; Energiewirtschaft; Nachhaltige Technologien; Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe, Technische Universität Wien

Neger, Christoph; MSc; Regionalpolitik; Ressourcenökonomik; POLICIES – Zentrum für Wirtschafts- und Innovationsforschung, Joanneum Research, Graz

Netherer, Sigrid; Dipl.-Ing. Dr.; Entomologie; Universität für Bodenkultur, Wien

Nicolussi, Kurt; Ao.Univ.-Prof. Dr.; Geographie; Dendrochronologie; Institut für Geographie, Universität Innsbruck

Oberforster , Michael; Dipl.-Ing.; Landwirtschaft; Pflanzenzucht; Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit (AGES), Wien

Olefs, Marc; Mag. Dr.; Strahlung; Schneedecke; Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien

Omann, Ines; Dr.; Nachhaltiges Wirtschaften; Umweltforschung; Sustainable Europe Research Institute (SERI), Wien

Otto, Jan-Chridtoph; Dr.; Geomorphologie; Geophysik; Institut für Geographie und Geologie, Universität Salzburg

Parajka, Juraj; Univ.-Ass. Dr.; Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Technische Universität Wien

Passer, Alexander; Dr.; Bauingenieurwesen; Nachhaltiges Bauen; Technische Universität Graz

Paula, Michael; Dipl.-Ing.; Technologieforschung; BMVIT, Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien, Wien

Pauli, Harald; Priv.-Doz. Mag. Dr.; Biodiversität; Botanik; Institut für Interdisziplinäre Gebirgsforschung (IGF), Österreichische Akademie der Wissenschaften, Wien

Perzl, Frank; Dipl.-Ing.; Waldlawinen; Naturgefahren; Institut für Naturgefahren, Bundesforschungs- und

Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW), Innsbruck

Peticzka, Robert; Ass.-Prof. Dr.; Paläoböden; Quartärforschung; Institut für Geographie und Regionalforschung, Universität Wien

Pirgmaier, Elke; Mag.; Indikatoren der Lebensqualität; Sustainable Europe Research Institute (SERI), Wien

Plutzar, Christoph; Mag. Dr., MAS; Landnutzung; Geographische Informationssysteme; Institut für Soziale Ökologie, Alpen-Adria Universität Klagenfurt, Wien

Pötsch, Erich; Dipl.-Ing. Univ.Doz. Dr.; Landwirtschaft; Grünlandwirtschaft; LFZ Raumberg-Gumpenstein, Irdning

Potzmann, Roland; Mag.; Meteorologie; meteorologische Messungen; Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien

Prager, Christoph; Dr.; Massenbewegungen; Ingenieurgeologie; alpS Centre for Climate Change Adaptation, Innsbruck

Prein, Andreas; Mag. Dr.; Klimatologie; Klimamodellierung; Wegener Center für Klima und Globalen Wandel, Universität Graz

Prettenthaler, Franz; Mag. Dr.; Regionalpolitik; Risikoökonomik; POLICIES – Zentrum für Wirtschafts- und Innovationsforschung, Joanneum Research, Graz

Pröbstl-Haider , Ulrike; Univ.-Prof. Dr.; Landschaftsentwicklung; Tourismus; Institut für Landschaftsentwicklung, Erholungs- und Naturschutzplanung, Universität für Bodenkultur, Wien

Prutsch, Andrea; Dipl.-Ing.; Umweltforschung; Klimawandel; Umweltbundesamt, Abteilung für Umweltfolgenabschätzung und Klimawandel, Wien

Purzner, Maria; Dr.; Industrielle Prozesse; F-Gase; Umweltbundesamt, Abteilung für Luftreinhaltung und Klimaschutz, Wien

Puxbaum, Hans; Univ.-Prof. Dr.; Umweltanalytik; Luftchemie; Institut für Chem.Technologien und Analytik, Technische Universität Wien

Rabitsch, Wolfgang; Mag. Dr.; Biodiversität; Naturschutz; Umweltbundesamt, Wien

Radlherr, Manfred; Dr.; Umwelthygiene; Niederösterreichische Landesregierung, St. Pölten

Radunsky, Klaus; Dr.; Emissionshandel; Klimapolitik; Umweltbundesamt, Registerstelle gemäß EZG, Wien

Rauch, Wolfgang; Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.; Wasserressourcenmanagement; Institut für Infrastruktur, Universität Innsbruck

Renoldner, Klaus; Dr., MSc; Medizin und Soziale Verantwortung; praktischer Arzt und unabhängiger Konsulent für Nachhaltige Entwicklung, Neupölla

Resch, Gustav; Dipl.-Ing. Dr.; Energiewirtschaft; Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe, Technische Universität Wien

Rezai, Armon; Dr.; Green growth; Makroökonomie; Institut für ökologische Ökonomie, Wirtschaftsuniversität Wien

Rott, Eugen; Ao.Univ.-Prof. Dr.; Institut für Botanik, Universität Innsbruck

Sailer, Rudolf; Dr.; Permafrost; Glaziologie; Institut für Geographie, Universität Innsbruck

Salinas, José Luis ; Dipl.-Ing.; Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Technische Universität Wien

Samimi, Cyrus; Univ.-Prof. Dr.; Geoökologie; Klimatologie; Institut für Geographie, Universität Bayreuth

Sass, Oliver; Univ.-Prof. Dr.; Geomorphologie; Mensch-Umwelt-Forschung; Institut für Geographie und Raumforschung, Universität Graz

Scharl, Arno; Univ.-Prof. DDr.; Wirtschaftsinformatik; Medienanalyse; Department of New Media Technology, MODUL University Vienna

Schenk, Cornelia; Mag.; Emissionsprojektionen; Umweltbundesamt, Abteilung für Luftreinhaltung und Klimaschutz, Wien

Schindlbacher, Andreas; Mag. Dr.; Bodenökologie; Institut für Waldökologie und Boden, Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW), Wien

Schlatzer, Martin; Mag.; Lebensmittelrisiko; Universität für Bodenkultur, Wien

Schleicher, Stefan; Em. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.; Nachhaltiges Wirtschaften; Klimawandel; Wegener Center für Klima und Globalen Wandel, Universität Graz

Schleper, Christa; Univ.-Prof. Dipl.Biol. Dr.; Department of Ecogenomics and Systems Biology, Universität Wien

Schmidl, Christoph; Dipl.-Ing. Dr.; Biomassefeuerungstechnik; Emissionsbildung; BIOENERGY2020+ GmbH, Wieselburg

Schmidt, Johannes; Dipl.-Ing. Dr.; Ökonomie; Alternativenergien; Universität für Bodenkultur, Wien

Schmidt-Kloiber, Astrid; Dipl.-Ing. Dr.; Limnologie; Universität für Bodenkultur, Wien

Schmutz, Stefan; Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.; Limnologie; Universität für Bodenkultur, Wien

Schneider , Jürgen; Dr.; Klimapolitik; Treibhausgasemissionen; Umweltbundesamt Wien

Schnitzer, Hans; Ao.Univ.-Prof.; Verfahrenstechnik; Technische Universität Graz

Schöner, Wolfgang; Dr.; Glaziologie; Klimawandel; Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien

Schönhart, Martin; Dipl.-Ing. Mag. Dr.; Agrarökonomie; Agrarpolitik; Institut für Nachhaltige Wirtschaftsentwicklung, Universität für Bodenkultur, Wien

Schopf, Axel; Univ.-Prof. Dr.phil.; Entomologie; Universität für Bodenkultur, Wien

Schröter, Dagmar; Dr.; Ökosystem Dienstleistungen; Transdisziplinarität; Department of Environmental Systems Science, ETH Zürich

Schrott, Lothar; Univ.-Prof. Dr.; Geomorphologie; Gebirgspermafrost; Institut für Geographie und Geologie, Universität Salzburg

Schulz, Niels; Dr.; Transformationsforschung; Ökologie; selbständinger Umweltberater, Wien

Seher, Walter; Ass.-Prof. Dr.; Raumplanung; Naturgefahren; Institut für Raumplanung, ländliche Neuordnung; Universität für Bodenkultur, Wien

Seibert, Petra; Univ.-Prof. Dr.; Meteorologie; Institut für Meteorologie und Geophysik, Universität Wien

Seidl, Rupert; Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.; Waldökologie; Waldbau; Universität für Bodenkultur, Wien

Senoner, Tobias ; Dipl.-Ing.; Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau, Universität für Bodenkultur Wien

Simic, Stana; Dr.; Meteorologie; Atmosphärische Strahlung; Institut für Meteorologie, Universität für Bodenkultur, Wien

Spangl, Wolfgang; Dipl.-Ing. Mag.; Luftqualität; Umweltmeteorologie; Umweltbundesamt, Wien

Spiegel, Heide; Privatdozentin Dr.; Bodenökologie; Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit (AGES), Abteilung Bodengesundheit und Pflanzenernährung, Wien

Spötl, Christoph; Univ.-Prof. Dr.; Geologie; Quartärforschung; Institut für Geologie, Universität Innsbruck

Stagl , Sigrid; Univ.-Prof. Dr.; Ökologische Ökonomie; Institut für ökologische Ökonomie, Wirtschaftsuniversität Wien

Steiger, Robert; Mag. Dr.; Tourismus und Klimawandel; Regionalforschung; MCI Management Center Innsbruck

Steiner, Andrea; Priv.-Doz. Mag. Dr.; Geophysik; Umweltsystemwissenschaft; Wegener Center für Klima und Globalen Wandel, Universität Graz

Steininger, Karl; Ao.Univ.-Prof. Dr.; Umweltökonomie; Umweltpolitik; Wegener Center für Klima und Globalen Wandel, Universität Graz

Steurer, Reinhard; Assoz. Prof. Dr.; Politikwissenschaft; Umweltpolitik; Institut für Wald-, Umwelt- und Ressourcenpolitik, Universität für Bodenkultur, Wien

Stöhr, Dieter; Dipl.-Ing. Dr.; Waldökologie; Waldboden; Amt der Tiroler Landesregierung, Abteilung Forstorganisation, Innsbruck

Stötter, Johann; Univ.-Prof. Dr.; Glaziologie; Klimafolgen; Institut für Interdisziplinäre Gebirgsforschung, ÖAW, Innsbruck

Strasser, Ulrich; Univ.-Prof. Dr.; Schnee; Permafrost; alpS-Centre for Climate Change Adaptation, Innsbruck

Strauss, Peter; Dipl.-Ing. Dr.; Bodenhydrologie; Erosion; Institut Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, Bundesamt für Wasserwirtschaft, Petzenkirchen

Streicher, Wolfgang; Univ.-Prof. Dr.; Energieeffizientes Bauen; Universität Innsbruck

Suklitsch, Martin; Mag. Dr.; Meteorologie; Modellierung; Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Abteilung Modellapplikationen, Wien

Tappeiner, Ulrike; Univ.-Prof. Dr.; Gebirgsökologie;, Ökosystemleistungen; Institut für Ökologie, Universität Innsbruck

Themeßl, Mathias; Mag. Dr.; Klimatologie; Downscaling; Climate Change Centre Austria, Graz

Titz, Michaela; Dipl.-Ing.; Institut für Prozess- und Partikeltechnik, Technische Universität Graz

Trimmel, Heidi; Dipl.-Ing.; Landschaftsplanung; Gebäudeklimatologie; Institut für Meteorologie; Universität für Bodenkultur, Wien

Truhetz, Heimo; Mag. Dr.; Umweltsystemwissenschaften; Klimamodellierung; Wegener Center für Klima und Globalen Wandel, Universität Graz

Türk, Andreas; Mag., MBA; Umweltpolitik; Klimawandel; Joanneum Research, Graz

Viglione, Alberto; Dr.; Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Technische Universität Wien

Vogl, Wolfgang; Mag.; Ornithologie; Konrad-Lorenz-Institut für Vergleichende Verhaltensforschung, Wien

Wallner, Peter; Dr.; Medizin und Umweltschutz; Gesundheitskommunikation; freier Wissenschaftsjournalist

Walochnik, Julia; Assoz. Prof. Dr.; Parasitologie; Infektiologie; Institut für Medizinische Prophylaxe und Tropenmedizin, Medizinische Universität Wien

Weihs, Philipp; Ao.Univ.-Prof. Mag. Dr.; Atmosphärische Strahlung; Institut für Meteorologie, Universität für Bodenkultur, Wien

Weilguni, Viktor; Dr.; Klimatologie; BMLFUW, Abteilung VII/3 - Wasserhaushalt, Wien

Weisz, Ulli; Mag. ; Ökologie; Soziale Ökologie; Gesundheit im Kontext nachhaltiger Entwicklung; Institut für Soziale Ökologie, Alpen-Adria Universität Klagenfurt, Wien

Wenzel, Walter W.; Dipl.-Ing. Dr. Univ.-Prof.; Bodenschutz; Biogeochemie der Rhizosphäre; Institut für Bodenforschung, Universität für Bodenkultur, Wien

Wesely, Julia; MSc; Politikwissenschaften; Nachwachsende Rohstoffe; Sustainable Europe Research Institute (SERI), Wien

Winiwarter, Wilfried; Univ.-Prof. Dr.; Emissionen, Luftchemie, Systemwissenschaften; Institut für Systemwissenschaften, Innovations- und Nachhaltigkeitsforschung, Universität Graz

Winkler, Claudia; Mag.; Risiko- und Ressourcenökonomik; POLICIES – Zentrum für Wirtschafts- und Innovationsforschung, Joanneum Research, Graz

Winkler, Hans; Univ.-Prof. Dr.; Ornithologie; Konrad-Lorenz-Institut für Vergleichende Verhaltensforschung, Wien

Zangerl, Christian; Univ.-Prof. Dr.; Massenbewegungen; Ingenieurgeologie; Institut für Angewandte Geologie, Universität für Bodenkultur, Wien

Zech, Sibylla; Univ.Prof. Dipl.-Ing.; Raumplanung; Department für Raumplanung, Technische Universität Wien

Zechmeister, Andreas; Mag. DI DI(FH); Emissionsprojektion und -inventur; Umweltbundesamt, Abteilung für Luftreinhaltung und Klimaschutz, Wien

Zechmeister, Harald; Priv.-Doz. Mag. Dr.; Department für Naturschutzbiologie, Vegetations- und Landschaftsökologie, Universität Wien.

Zechmeister-Boltenstern, Sophie; Univ.-Prof. Dr.; Bodenmikrobiologie; Bodenkunde; Institut für Bodenforschung, Universität für Bodenkultur, Wien

Zeidler, Antonia; Dr.; Lawinenmechanik; Lawinenprognose; Institut für Naturgefahren, Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW), Innsbruck

Zuvela-Aloise, Maja; Dipl.-Ing. Dr.; Stadtklimatologie; Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien

Anhang 3: Zitierweisen

Zitierweise des Gesamtbandes

APCC (2014): Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich, 1096 Seiten. ISBN 978-3-7001-7699-2

Zitierweise der Zusammenfassung für Entscheidungstragende (ZfE)

APCC (2014): Zusammenfassung für Entscheidungstragende (ZfE). In: Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich.

Citation of the Summary for Policymakers (SPM)

APCC (2014): Summary for Policymakers (SPM). In: Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14), Austrian Panel on Climate Change (APCC), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich.

Zitierweise der Synthese

Kromp-Kolb, H., N. Nakicenovic, R. Seidl, K. Steininger, B. Ahrens, I. Auer, A. Baumgarten, B. Bednar-Friedl, J. Eitzinger, U. Foelsche, H. Formayer, C. Geitner, T. Glade, A. Gobiet, G. Grabherr, R. Haas, H. Haberl, L. Haimberger, R. Hitzenberger, M. König, A. Köppl, M. Lexer, W. Loibl, R. Molitor, H. Moshammer, H-P. Nachtnebel, F. Prettenthaler, W. Rabitsch, K. Radunsky, L. Schneider, H. Schnitzer, W. Schöner, N. Schulz, P. Seibert, S. Stagl, R. Steiger, H. Stötter, W. Streicher, W. Winiwarter (2014): Synthese. In: Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich.

Citation of the Synthesis

Kromp-Kolb, H., N. Nakicenovic, R. Seidl, K. Steininger, B. Ahrens, I. Auer, A. Baumgarten, B. Bednar-Friedl, J. Eitzinger, U. Foelsche, H. Formayer, C. Geitner, T. Glade, A. Gobiet, G. Grabherr, R. Haas, H. Haberl, L. Haimberger, R. Hitzenberger, M. König, A. Köppl, M. Lexer, W. Loibl, R. Molitor, H. Moshammer, H-P. Nachtnebel, F. Prettenthaler, W. Rabitsch, K. Radunsky, L. Schneider, H. Schnitzer, W. Schöner, N. Schulz, P. Seibert, S. Stagl, R. Steiger, H. Stötter, W. Streicher, W. Winiwarter(2014): Synthesis. In: Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14), Austrian Panel on Climate Change (APCC), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich.

Zitierweise der einzelnen Kapitel

Band 1: Klimawandel in Österreich: Einflussfaktoren und Ausprägungen

Haimberger, L., P. Seibert, R. Hitzenberger, A. Steiner und P. Weihs (2014): Das globale Klimasystem und Ursachen des Klimawandels. In: Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich, S. 137–172.

Winiwarter, W., R. Hitzenberger, B. Amon, H. Bauer†, R. Jandl, A. Kasper-Giebl, G. Mauschitz, W. Spangl, A. Zechmeister und S. Zechmeister-Boltenstern, (2014): Emissionen und Konzentrationen von strahlungswirksamen atmosphärischen Spurenstoffen. In: Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich, S. 173–226.

Auer, I., U. Foelsche, R. Böhm†, B. Chimani, L. Haimberger, H. Kerschner, K.A. Koinig, K. Nicolussi und C. Spötl, 2014: Vergangene Klimaänderung in Österreich. In: Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Cli-

mate Change (APCC), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich, S. 227–300.

Ahrens, B., H. Formayer, A. Gobiet, G. Heinrich, M. Hofstätter, C. Matulla, A.F. Prein und H. Truhetz, 2014: Zukünftige Klimaentwicklung. In: Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich, S. 301–346.

Schöner, W., A. Gobiet, H. Kromp-Kolb, R. Böhm†, M. Hofstätter und M. Zuvela-Aloise, 2014: Zusammenschau, Schlussfolgerungen und Perspektiven. In: Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich, S. 347–380.

Band 2: Klimawandel in Österreich: Auswirkungen auf Umwelt und Gesellschaft

Stötter, J., H. Formayer, F. Prettenthaler, M. Coy, M. Monreal und U. Tappeiner, 2014: Zur Kopplung zwischen Treiber- und Reaktionssystemen sowie zur Bewertung von Folgen des Klimawandels. In: Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich, S. 383–410.

Nachtnebel, H.P., M. Dokulil, M. Kuhn, W. Loiskandl, R. Sailer, W. Schöner 2014: Der Einfluss des Klimawandels auf die Hydrosphäre. In: Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich, S. 411–466.

Lexer, M.J., W. Rabitsch, G. Grabherr, M. Dokulil, S. Dullinger, J. Eitzinger, M. Englisch, F. Essl, G. Gollmann, M. Gottfried, W. Graf, G. Hoch, R. Jandl, A. Kahrer, M. Kainz, T. Kirisits, S. Netherer, H. Pauli, E. Rott, C. Schleper, A. Schmidt- Kloiber, S. Schmutz, A. Schopf, R. Seidl, W. Vogl, H. Winkler, H. Zechmeister, 2014: Der Einfluss des Klimawandels auf die Biosphäre und Ökosystemleistungen. In: Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich, S. 467–556.

Glade, T., R. Bell, P. Dobesberger, C. Embleton-Hamann, R. Fromm, S. Fuchs, K. Hagen, J. Hübl, G. Lieb, J.C. Otto, F. Perzl, R. Peticzka, C. Prager, C. Samimi, O. Sass, W. Schöner, D. Schröter, L. Schrott, C. Zangerl und A. Zeidler, 2014: Der Einfluss des Klimawandels auf die Reliefsphäre. In: Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich, S. 557–600.

Baumgarten, A., C. Geitner, H.P. Haslmayr und S. Zechmeister-Boltenstern, 2014: Der Einfluss des Klimawandels auf die Pedosphäre. In: Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich, S. 601–640.

König, M., W. Loibl, R. Steiger, H. Aspöck, B. Bednar-Friedl, K.M. Brunner, W. Haas, K.M. Höferl, M. Huttenlau, J. Walochnik und U. Weisz, 2014. Der Einfluss des Klimawandels auf die Antroposphäre. In: Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich, S. 641–704.

Band 3: Klimawandel in Österreich: Vermeidung und Anpassung

Bednar-Friedl, B., K. Radunsky, M. Balas, M. Baumann, B. Buchner, V. Gaube, W. Haas, S. Kienberger, M. König, A. Köppl, L. Kranzl, J. Matzenberger, R. Mechler, N. Nakicenovic, I. Omann, A. Prutsch, A. Scharl, K. Steininger, R. Steurer und A. Türk, 2014: Emissionsminderung und Anpassung an den Klimawandel. In: Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich, S. 707–770.

Eitzinger, J., H. Haberl, B. Amon, B. Blamauer, F. Essl, V. Gaube, H. Habersack, R. Jandl, A. Klik, M. Lexer, W. Rauch, U. Tappeiner und S. Zechmeister-Boltenstern, 2014: Land- und Forstwirtschaft, Wasser, Ökosysteme und Biodiversität. In: Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich, S. 771–856.

Haas, R., R. Molitor, A. Ajanovic, T. Brezina, M. Hartner, P. Hirschler, G. Kalt, C. Kettner, L. Kranzl, N. Kreuzinger, T. Macoun, M. Paula, G. Resch, K. Steininger, A. Türk und S. Zech, 2014: Energie und Verkehr. In: Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich, S. 857–932.

Moshammer, H., F. Prettenthaler, A. Damm, H.P. Hutter, A. Jiricka, J. Köberl, C. Neger, U. Pröbstl-Haider, M. Radlherr, K. Renoldner, R. Steiger, P. Wallner und C. Winkler, 2014: Gesundheit und Tourismus. In: Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich, S. 933–978.

Schnitzer, H., W. Streicher und K.W. Steininger, 2014: Produktion und Gebäude. In: Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich, S. 979–1024.

S. Stagl, Schulz, N., K. Kratena, R. Mechler, E. Pirgmaier, K. Radunsky, A. Rezai und A. Köppl, 2014: Transformationspfade. In: Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich, S. 1025–1076.